

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERCITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTATION EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITUE

Étude thermodynamique et simulation du cycle de liquéfaction d'Azote

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES
FILIERE : GENIE MECANIQUE
SPECIALITE : ENERGETIQUE

PRESENTER PAR :
AMIRAT MOHAMED CHERIF

DERECTEUR DU MEMOIRE :
KADRI S. (MAA) UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT :	MZAD H.	(Pr)	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
EXAMINATEURS :	BOUMARAF L.	(Pr)	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
	DJEMILI A.	(MCA)	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
	KADRI S.	(MAA)	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

Année: 2017/2018



REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens à remercier mon DIEU, notre créateur, pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail.

Je remercié, les plus respectueux et anticipes vont à mon encadreur M^R KADRI.S pour ses conseils judicieux qui m'a dirigé et qui a été à la hauteur de sa noble tache.

J'adresse avec tout mon respect mon remerciements aux L'ensemble des enseignements du département : "Génie des mécanique"

Nous remercions aussi tout ce qui nous a contribués de prés ou de loin.

Michamed Chérif





Dédicaces

*Je dédie le fruit de mes années d'études
à mes très chers parents qui m'ont tout donné, de leurs
amour et leurs sacrifices éternels pour que je puisse suivre mes
études dans des bonnes conditions et qui ne cessent pas de
m'encourager et de veiller pour mon bien, sans leurs soutient
ce travail n'aurait jamais vue les jours.*

*Et aussi à mes frères et mes sœurs chacun par son
prénom, et à toute ma famille.*

A tous mes amis et collègues sans exception.

Mohamed Chérif



NOMENCLATURE

LETTRES LATINES NON INDICEES		
Symbole	Désignation	Unité
C_p	La chaleur spécifique du gaz à pression constante	[KJ/K.Kg]
C_m	Capacité thermique massique	[KJ/K.Kg]
T	Température	[K]
R	Constante universelle des gaz parfaits	[KJ/mol.K]
h	Constante de PLANCK	Sans dimension
H	Enthalpie massique	[KJ/kg]
S	Entropie massique	[KJ/kg.K]
v	Vitesse	[m/s]
P	Pression	[bar]
m	Masse totale du gaz	[Kg]
m_f	Masse du gaz liquéfiée	[Kg]
m_e	Masse du gaz passant par l'expandeur	[Kg]
E_T	Energie totale	[KJ]
U	Energie interne	[KJ]
E_C	Energie cinétique	[KJ]
E_P	Energie potentielle	[KJ]
g	Gravité	[m/s ²]
z	Hauteur	[m]
W	Travail par unité de masse	[KJ/kg]
φ	Chaleur par unité de masse	[KJ/kg]
\dot{m}	Débit massique	[Kg/s]
\dot{m}_v	Débit massique de vapeur	[Kg/s]
\dot{m}_l	Débite massique de liquide	[Kg/s]
h_f	Enthalpie de liquide	[KJ/kg]
h_g	Enthalpie massique de vapeur	[KJ/kg]
h_T	Enthalpie massique totale	[KJ/kg]
(W/m)	Le travail nécessaire par unité de masse du gaz comprimée	[KJ/Kg]
(W/m_f)	Le travail nécessaire par unité de masse du gaz liquéfiée	[KJ/Kg]
W_e	Travail de l'expandeur	[KJ/Kg]

q_a	L'apport de chaleur du milieu ambiant	[KJ/Kg]
q_{in}	l'imperfection de récupération thermique de l'échangeur	[KJ/Kg]
Y	La fraction de la masse du gaz passant par l'expandeur par la masse totale.	sans dimension
X	La fraction de la masse du gaz liquéfiée par la masse totale.	sans dimension
PFD	Process flow diagram	-

LETTRES GRECS		
Désignation	Désignation	Unité
ε	Efficacité	%
η	rendement	%
μ_{J-T}	Coefficient de Joule- Thomson	sans dimension
μ_s	Coefficient de détente isentropique.	sans dimension

Liste Des Figures

Chapitre I

Figure I-1:	Echelle de température thermodynamique.....	4
Figure I-2:	Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs.....	6

Chapitre II

Figure II-1 :	Diagramme P-V de changement de phase	19
Figure II-2 :	Détente de joule Thomson.	24
Figure II-3 :	Les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme(T-P).....	25
Figure II-4 :	Cycle du Linde.....	27
Figure II-5 :	Cycle de Linde : diagramme T-S.....	27
Figure II-6 :	Cycle de Linde : diagramme T-S.....	28
Figure II-7 :	Cycle de Linde.....	29
Figure II-8 :	Cycle de Brayton inverse.....	29
Figure II-9 :	Schéma de cycle de Linde et de cycle de Brayton inverse.....	29
Figure II-10 :	Schéma de principe de cycle de Claude.....	30
Figure II-11 :	Diagramme (T-S) de cycle de Claude.....	30
Figure II-12 :	Echangeur cryogénique principale bobinés.....	32

Chapitre III

Figure III.1 :	Système thermodynamique en régime permanent.....	37
Figure III.2 :	Schéma de cycle de Linde et le diagramme T-S.....	37
Figure III.3 :	Volume de contrôle C1.....	38
Figure III.4 :	Volume de contrôle C2.....	39
Figure III.5 :	Volume de contrôle C3.....	40
Figure III.6 :	Volume de contrôle C4.....	41
Figure III.7 :	Schéma de cycle de CLAUDE et le diagramme T-S.....	42
Figure III.8 :	Volume de contrôle C5.....	42
Figure III.9 :	Schéma du cycle de Linde avec les pertes de l'imperfection et le rapport de chaleur de milieu ambiant.....	46
Figure III.10 :	Diagramme de quantité du liquide extraite en fonction de taux de compression.....	53
Figure III.11 :	Diagramme de quantité du liquide extraite en fonction de température d'entrée.....	61
Figure III.12 :	Schéma simplifié d'échangeur contre courant.....	61
Figure III.13 :	Diagramme de distribution de température.....	62
Figure III.14 :	Schéma de cycle de Linde et le diagramme T-S avec les pertes d'imperfection.....	62

Figure III.15 :	Diagramme de quantité du liquide extraite en fonction de l'efficacité de l'échangeur de chaleur.....	65
------------------------	---	-----------

Chapitre IV

Figure IV.1 :	fenêtre de sélectionner des composées.....	68
Figure IV.2 :	fenêtre de choisir le modèle thermodynamique.....	69
Figure IV.3 :	le choie de modèle thermodynamique « Peng-Robinson ».....	69
Figure IV.4 :	la feuille du procédé.....	70
Figure IV.5 :	PFD (Process Flow Diagram) de Cycle de Linde pour la liquéfaction de l'Azote.....	72
Figure IV.6 :	Diagramme flux de chaleur en fonction de la température.....	74
Figure IV.7 :	Diagramme DTLM (différence logarithmique moyen de température) en fonction de la température.....	75
Figure IV.8 :	Diagramme le coefficient d'échange global en fonction de la température.....	75
Figure IV.9 :	Diagramme Enthalpie en fonction de la température.....	76
Figure IV.10 :	PFD (Process Flow Diagram) de Cycle de CLAUDE pour la liquéfaction de l'Azote N₂.....	78
Figure IV.11 :	Diagramme flux de chaleur en fonction de la température au de l'échangeur 1.....	81
Figure IV.12 :	Diagramme flux de chaleur en fonction de la température au de l'échangeur 2.....	81
Figure IV.13 :	Diagramme flux de chaleur en fonction de la température au de l'échangeur 3.....	82

Liste Des Tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 :	Conditions critiques des gaz permanents.....	20
Tableau II.1 :	Domaines d'utilisation des gaz industriels.....	22

Chapitre III

Tableau III.1 :	Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $P_r=200$	47
Tableau III.2 :	Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $P_r=150$	49
Tableau III.3 :	Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $P_r=100$	51
Tableau III.4 :	Influence de taux de compression sur les paramètres du cycle de Linde.....	53
Tableau III.5 :	Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $T_1=290^0\text{K}$	54
Tableau III.6 :	Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $T_1=280^0\text{K}$	56
Tableau III.7 :	Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $T_1=273^0\text{K}$	58
Tableau III.8 :	Influence de température d'entre de compresseur sur les paramètres du cycle de Linde.....	60
Tableau III.9 :	Paramètres du cycle de Linde.....	63
Tableau III.10 :	Les résultats d'influence de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur les paramètres du cycle de Linde.....	65

Chapitre IV

Tableau IV. 1:	Résultat de simulation par HYSYS pour cycle de LINDE.....	73
Tableau IV. 2:	Résultat de simulation par HYSYS pour cycle de CLAUDE.....	80

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude thermodynamique de différentes étapes du procédé de liquéfaction d'azote et la recherche des facteurs affectant sur le cycle LINDE pour obtenir un meilleur rendement et une meilleure efficacité, le cycle cryogénique de Linde et de Claude est appliqué à la liquéfaction de gaz industriels, Le travail suivant vise à simuler le cycle cryogénique de Linde et Claude à l'aide de logiciel Aspen HYSYS

Mots clé : thermodynamique, cycle de Linde, cryogénie, cycle de Claude

Abstract

The objective of this work is the thermodynamic study of different stages of the nitrogen liquefaction process and the search for factors affecting the LINDE-HAMPSON system to obtain a better yield and a better efficiency, the cryogenic cycle of LINDE-HAMPSON and CLAUDE is Applied to the liquefaction of industrial gas spills, The following work aims to simulate the cryogenic cycle of LINDE-HAMPSON and CLAUDE using Aspen HYSYS software

Key words: thermodynamics, Linde's cycle, cryogenics, Claude's cycle

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الديناميكية الحرارية لمراحل مختلفة من عملية تمييع النيتروجين والبحث عن العوامل التي تؤثر على دورة ليند. تم تطبيق دورة ليند و دورة كلود لتميع مختلف الغازات الصناعية، يهدف العمل التالي إلى محاكاة دورة التبريد ليند باستخدام برنامج Aspen HYSYS

الكلمات المفتاحية: الديناميكا الحرارية ، دورة ليند ، دورة التبريد ، دورة كلود

SOMMAIRE

Introduction général.....	1
Objectif du thème.....	2
Présentation du mémoire.....	2

Chapitre I : Notions sur la cryogénie

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition.....	3
I.3. Historique.....	5
I.4. Les propriétés physiques des fluides et des matériaux aux basses températures.....	7
I.4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques.....	7
I.4.2. Les propriétés des matériaux.....	7
I.4.2.1. Propriétés thermiques.....	8
I.4.2.2. Propriétés mécanique.....	10
I.5. Transfert thermique	11
I.5.1. Conduction.....	11
I.5.2. Convection.....	11
I.5.3. Rayonnement.....	12
I.6. Stockage cryogénique.....	13
I.7. Domaines d'utilisation de la cryogénie.....	14
I.8. Importance et utilisation des gaz liquéfiés.....	15
I.8.1. Obtention des gaz purs.....	15
I.8.2. Facilité et économie du transport.....	16
I.8.3. Usage des basses températures.....	16

Chapitre II : Les cycles de liquéfaction

II.1. Définition de la réfrigération et de la liquéfaction.....	18
II.1.1. La réfrigération.....	18
II.1.2. La liquéfaction.....	18
II.2. Propriétés de l'air.....	20
II.2.1. Propriétés et utilisations de l'azote.....	20
II.2.2. Domaines d'utilisation des gaz industriels.....	21
II.3. Comment réaliser la liquéfaction des gaz.....	22
II.4. Production des basses températures.....	23
II.4.1. La détente Joule-Thomson (J-T).....	23
II.4.2. La détente adiabatique.....	26
II.5. Les différents types de systèmes de liquéfaction.....	26
II.5.1. Cycle de Linde pour la liquéfaction des gaz.....	27

II.5.2.	Cycle de liquéfaction avec travail extérieur : Cycle de Brayton inverse.....	28
II.5.3.	Cycle de Claude pour la liquéfaction.....	29
II.6.	Equipements utilisés.....	31
II.6.1.	Compresseurs cryogéniques.....	31
II.6.2.	Les échangeurs de chaleur.....	32
II.6.3.	Les régénérateurs.....	32
II.6.4.	Les détenteurs cryogéniques.....	33
II.6.5.	Autres composants.....	33
II.7.	Performances des cycles de liquéfaction.....	34

Chapitre III : Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote N₂

III.1.	Rappel thermodynamique.....	36
III.1.1.	premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert.....	36
III.2.	Bilan énergétique du cycle de la liquéfaction.....	37
III.2.1.	Cycle de Linde.....	37
III.2.2.	Cycle de Claude.....	42
III.3.	Problématique.....	45
III.3.1.	Influence de taux de compression sur les paramètres du cycle de Linde.....	46
III.3.1.1.	Pour taux de compression Pr=200.....	46
III.3.1.2.	Pour taux de compression Pr=150.....	49
III.3.1.3.	Pour taux de compression Pr=100.....	51
III.3.1.4.	Discussion du résultat.....	53
III.3.2.	Influence de température d'entre de compresseur sur les paramètres du cycle de Linde.....	54
III.3.2.1.	pour T ₁ =290 °K.....	54
III.3.2.2.	pour T ₁ =280 °K.....	56
III.3.2.3.	pour T ₁ =273 °K.....	58
III.3.2.4.	Discussion du résultat.....	60
III.3.3.	Influence de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur les paramètres du cycle de Linde.....	61
III.3.3.1.	Efficacité d'un échangeur.....	62
III.3.3.2.	Pour ε=100%.....	64
III.3.3.3.	Pour ε=95%.....	64
III.3.3.4.	Pour ε=90%.....	64
III.3.3.5.	Pour ε=85%.....	64
III.3.3.6.	Discussion du résultat.....	65

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.1. Introduction.....	66
IV.2. Présentation du logiciel Aspen HYSYS.....	66
IV.2.1. Définition du HYSYS.....	66
IV.2.2. L'utilisation du logiciel HYSYS.....	67
IV.2.3. Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS.....	67
IV.3. Exemple de simulation du cycle de LINDE pour la liquéfaction de l'Azote N₂.....	71
IV.3.1. Discussion des résultats.....	73
IV.3.2. Flux de chaleur au niveau de l'échangeur (LNG-100).....	74
IV.3.3. Diagramme DTLM (différence logarithmique moyen de température) en fonction de la température.....	74
IV.3.4. Diagramme le coefficient d'échange global en fonction de la température.....	75
IV.3.5. Diagramme Enthalpie en fonction de la température.....	76
IV.4. Exemple de simulation du cycle de CLAUDE pour la liquéfaction de l'Azote N₂.....	76
IV.4.1. Discussion des résultats.....	80
IV.4.2. Flux de chaleur au niveau des échangeurs de chaleur.....	81
IV.5. Discussion de résultat de la simulation.....	82
Conclusion	83

Introduction général

Introduction général

La cryogénie est la science des basses températures se situant au dessous de la barre de 120 K (-153 °C). Cette température représente la limite à partir de laquelle les principaux gaz atmosphériques (Méthane, oxygène, azote, néon, hydrogène et hélium) se liquéfient. Elle possède de très nombreuses applications, notamment dans les secteurs alimentaire, médical, industriel et physique. Ces éléments sont utilisés sous forme liquide.

Les études des basses températures, réalisées dans le but de comprendre les phénomènes physiques qui s'y manifestent, ont développé de nombreuses possibilités, comme : La conservation des aliments à l'aide d'azote liquide, la supraconductivité, la superfluidité, le cryo-broyage, givrage ou condensation cryogénique, la récupération de plus de 90 % des gaz destructeurs de la couche d'ozone et la création, à partir d'azote liquide, de toutes sortes de neiges [1]

Ces techniques, à de très basses températures, sont utilisées pour les liquides cryogéniques tels que : l'hélium (TLHe= -269°C), l'hydrogène (TLH₂= -253°C), l'azote (TLN₂= -196°C), l'argon (TLAr= -187°C), l'oxygène (TLO₂= -183°C) et le GNL (TLGN= -161°C) [2]

Les développements simultanés de la technologie et de la physique aux basses températures sont intimement liés à la « course » à la liquéfaction des gaz appelés « permanents » ; hydrogène, azote, oxygène..

On peut utiliser l'oxygène de différentes façons, entre autres dans les moteurs de fusées, dans les chalumeaux pour couper et souder pour permettre la vie dans les vaisseaux spatiaux et la plongée sous-marine. L'azote est utilisé dans la fabrication de l'ammoniac contenu dans les engrais et dans le conditionnement des aliments congelés en les refroidissant rapidement afin d'éviter la destruction des tissus cellulaires [2].

Parmi les gaz industriels on trouve que l'Azote qui prédomine, due à leur vaste et diverses utilisations, dans notre présente étude ont s'intéresse comment va liquidée ce produit, Vu la diversité de domaines d'application des liquides cryogéniques, on doit donc être soucieux pour avoir une grande quantité des gaz liquéfiés consommant le minimum d'énergie[3]

Objet du thème

Dans les systèmes de liquéfaction des gaz, on rencontre un problème majeure c'est comment peut –t –on avoir le maximum du gaz liquéfié en fournissant le minimum du travail ? En quelque sorte, jouant sur quels paramètres pour pouvoir améliorer la performance de ces cycles dans ce travail

L'objectif, donc, de cette étude est la recherche de ces paramètres appliqués sur le cycle de LINDE pour la liquéfaction de l'azote pour obtenir une meilleure performance.

Présentation du mémoire

Dans ce travail on a quatre chapitres, La premier chapitre est consacré pour les notions sur la cryogénie et leurs utilisations, La deuxième chapitre et une étude bibliographique sur les cycles de la liquéfaction de l'azote et les domaines d'utilisation et leur paramètre, La troisième partie est une étude thermodynamique et énergétique sur le cycle de Linde de la liquéfaction de l'azote et l'influence de différent paramètre sur le rendement du cycle, et le quatrième chapitre est consacré a une simulation de cycle de LINDE et cycle de CLAUDE sur le logiciel Aspen HYSYS

Chapitre I :
Notions sur la cryogénie

I.1. Introduction

Le mot cryogénie signifie production de froid glacial, mais aujourd'hui, il est synonyme de basses températures. Sur l'échelle de température, il n'y a pas de distinction claire lorsque la plage de réfrigération ordinaire se termine et que la cryogénie commence. Cependant, le National Bureau of Standards de Boulder (Colorado) considère que la température est inférieure à 123K en tant que température de fonctionnement cryogénique. Cela peut être accepté parce que la température d'ébullition des gaz permanents comme l'hélium (He), l'hydrogène (H), le néon (Ne), etc. sont inférieures à 123K

L'ingénierie cryogénique traite du développement et de l'amélioration des techniques, procédés et équipements à basse température. Il traite de l'utilisation des phénomènes à basse température. En général, le système cryogénique se réfère à un groupe de composants interagissant impliquant une température basse. [4]

I.2. Définition

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J.Joule et S.Carnot, à la mécanique statistique des particules microscopique de L.Boltzman et J.W.Gibbs, et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque là considérés comme « non condensables », faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges, les appareils de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique.[1]

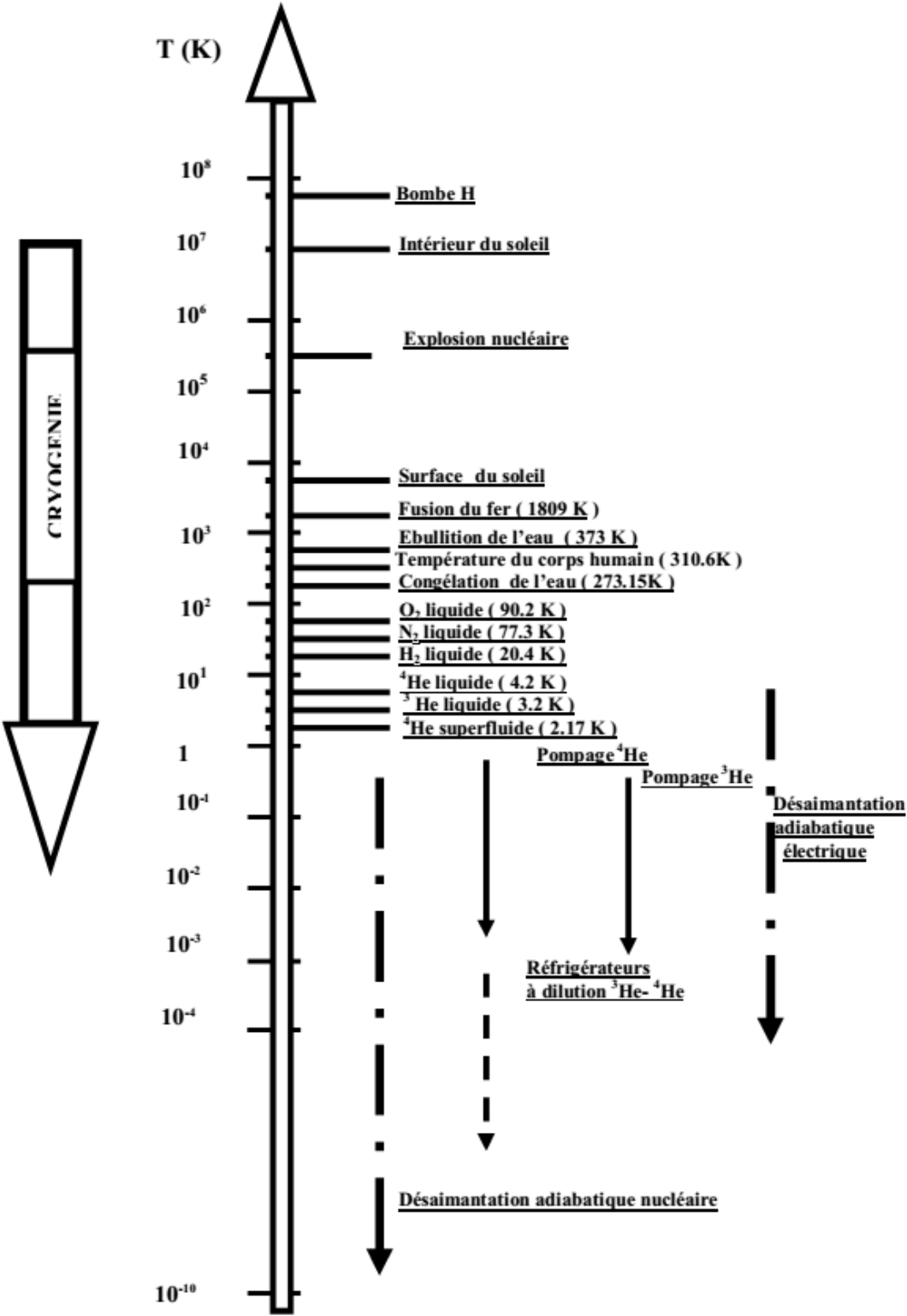


Figure I-1 : Echelle de température thermodynamique

I.3. Historique de la cryogénie

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et des physiciens.

Jusqu'en 1870, aucun développement significatif n'a été fait dans le domaine de la cryogénie. C'était en 1877 quand Louis Paul Cailletet, un ingénieur minier français a produit des brouillards de gouttelettes d'oxygène liquide. En avril 1883, Wroblewski et Olszewski obtinrent de l'azote liquéfié et de l'oxygène au laboratoire de l'Université de Cracovie, en Pologne.

En 1892, Dewar a développé un récipient isolé sous vide pour le stockage de fluide cryogénique. En 1907, Linde a installé la première usine de liquéfaction d'air en Amérique. En 1908, H.Kamerlingh Onnes liquéfie l'hélium. En 1916, la première production commerciale d'Argon a été faite. En 1917 et 1922, la première production commerciale d'hélium et de néon a été faite respectivement. En 1933, le refroidissement magnétique a d'abord été utilisé pour atteindre une température inférieure à 1K. En 1937, l'isolation en poudre évacuée a été utilisée pour la première fois à l'échelle commerciale dans des réservoirs de stockage de fluides cryogéniques.

En 1952, le bureau national du laboratoire de génie cryogénique des normes a été créé. En 1958, l'isolation cryogénique multicouche à haute efficacité a été développée. En 1966, un réfrigérateur à dilution utilisant des mélanges He3-He4 a été développé. En 1975, la température de transition super élevée record (23K) a été atteinte pour la première fois.[4]

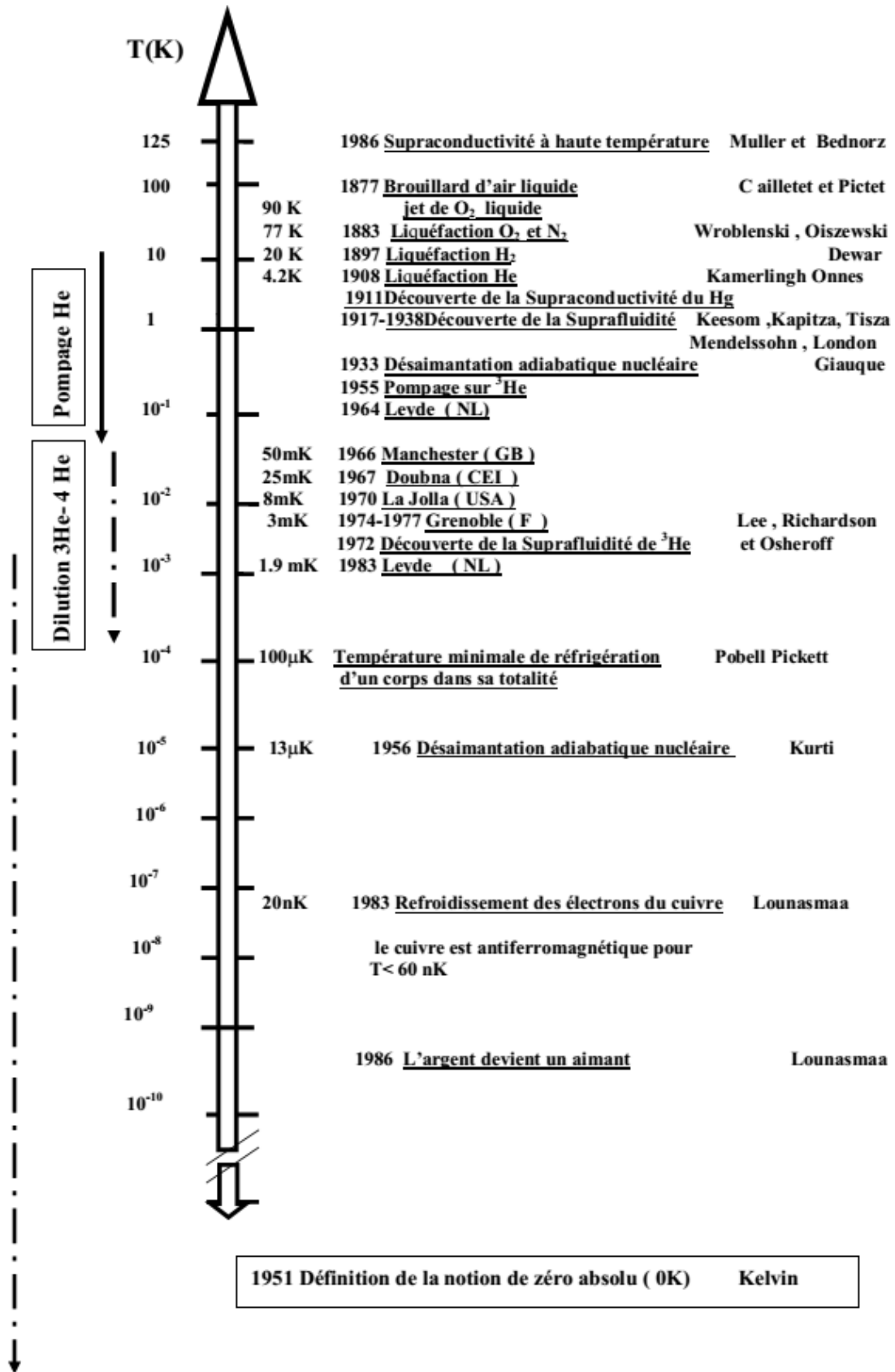


Figure I-2 : Différentes étapes vers les basses températures et leurs acteurs

I.4. Les propriétés physiques aux basses températures

I.4.1. Les propriétés des fluides cryogéniques

Les liquides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Au vu de leurs faibles températures critiques et de leurs pressions critiques modérées, les cryogènes sont souvent utilisés dans le domaine supercritique ; avec une transition continue de la phase liquide à la phase gazeuse et une divergence de certaines propriétés thermodynamiques au point critique. [5]

plus la viscosité diminue à basse température, plus les écoulements de liquide ou de vapeur deviennent fortement turbulents ; permettant d'atteindre des nombres de Reynolds très élevés lors d'expérience de laboratoire, ce qui constitue un outil précieux pour étudier les lois d'échelle de la turbulence des fluides. De plus, la variation simultanée de la densité de la viscosité et de la température permet de maintenir les conditions de similitude de **Reynolds** et de **Mach** dans les écoulements à échelle réduite ; ce phénomène est à la base des souffleries cryogéniques, outils essentiels pour la Conception des ailes d'avions supersoniques pour lesquels les effets de la compressibilité ne peuvent être négligés. Enfin, le taux de dilatation volumique élevé à basse température engendre des nombres de **Rayleigh** élevés et une forte convection naturelle. Des expériences pionnières ont récemment été menées sur les écoulements contrôlés à très hauts nombres de **Reynolds** et de **Rayleigh** en utilisant l'hélium cryogénique [6]

I.4.2. Les propriétés des matériaux

Les techniques de réalisation des matériaux cryogéniques et la préparation d'ensembles expérimentaux aux basses températures mettent en œuvre des matériaux très variés : Matériaux isolants, conducteurs, voire surconducteurs électriques, Matériaux de structure

I.4.2.1 Propriétés thermiques :

Les Propriétés thermiques sont associées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, etc. L'amplitude des vibrations diminue avec la température. D'autres effets peuvent aussi contribuer aux propriétés thermiques (caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc.)

a) Capacité thermique massique: la Capacité thermique massique d'un matériaux peut être considérée comme la somme de plusieurs contributions (contribution associée au réseau cristallin, cristaux isolants, contribution associée aux électrons libres c'est le cas des métaux conducteurs), telle que :

$$C = \sum_i C_i (T) = C_{ph} + C_e$$

C_{ph} : la capacité thermique massique associée au réseau cristallin en fonction de la température de DEBYE. A basse température, elle varie comme le cube de la température [7], [8]

$$C_{ph} = \beta \cdot T^3$$

Avec T : température absolue

$$\beta = \frac{12 \cdot \pi^4 \cdot R}{5 \cdot \theta_D^3}$$

Où R : Constante universelle des gaz parfaits.

θ_D : Température de Debye qui est une caractéristique des matériaux et qui est obtenue généralement par voie expérimentale, son expression théorique est donnée par :

$$\theta_D = \frac{h \cdot v}{\sigma} \left(\frac{3 \cdot N}{3 \cdot \pi \cdot V} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Où h : Constante de PLANCK,

σ : Constante de STEFAN –BOLTZMANN.

v : Vitesse du son dans le solide.

N/V : nombre d'atomes par unité de volume du solide.

b) Conductivité thermique:

On définit deux conductivités thermiques :

K_{ph} : la Conductivité thermique du réseau.

K_e : la Conductivité électronique.

Et la Conductivité thermique peut être représentée par la somme des deux contributions [7] :

$$K = K_{ph} + K_e$$

Avec :

$$K_{ph} = \frac{1}{3} \cdot C_{ph} \cdot V \cdot L_{ph} \cdot \rho$$

V : vitesse du son dans le solide.

ρ : Masse volumique

L_{ph} : libre parcours moyen des phonons

A basse température ($T \ll \theta_D$), V , ρ et L_{ph} peuvent être considérés comme constants et

$$K_{ph}/T^3 = \text{cte}$$

ET

$$K_e = (1/3)C_e \cdot V_F \cdot L_e \cdot \rho = \pi^2 \cdot n \cdot K_B^2 \cdot T \cdot (\tau/3 \cdot m_e)$$

m_e : Masse de l'électron.

n : nombre d'électrons libre par unité de volume.

V_F : la vitesse de fermi

L_e : le parcours moyen des électrons

τ : Temps moyen de diffusion ($\tau = L_A / V_F$)

A basse température $\tau = \text{cte}$, donc $K_e \propto T$

c) Dilatation thermique :

A basse température, l'existence de contraintes thermiques différentielles peut être la source d'efforts mécaniques pouvant entraîner des ruptures d'assemblage.

Le coefficient de dilatation linéaire α est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)$$

D'après la définition de α , on peut en déduire la variation de longueur relative

$$\Delta L/L = \int_n^{Tf} \alpha(T) dT$$

A haute température, cette variation est proportionnelle à T , par contre à basse température, elle est proportionnelle à T^4

I.4.3. Propriétés mécaniques :

Lorsqu'on construit une « structure » cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux [7] utilisés à la température de fonctionnement.

La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basse température.

Le comportement aux basses températures des différents métaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées (C.F.C) on peut citer le cuivre, nickel et ses alliages, l'aluminium et ses alliages, les aciers inoxydables (série 300), l'argent, le plomb, le laiton, L'or, le platine, en général ils restent ductiles jusqu'aux très basses températures.

Les systèmes cubiques centrés (C. C) tels que le fer α , les aciers ferritiques ; les aciers au carbone, Les aciers au nickel ($< 10\%$), le molybdène, le niobium, le chrome, le tungstène deviennent souvent Fragiles aux basses températures.

Dans les structures hexagonales compactes, on peut citer le zinc, le béryllium, le titane, le cobalt, le magnésium sont par fois fragiles, (zinc), par fois ductiles (titane), leur ductilité étant toute fois diminuée par la présence d'impuretés et principalement par l'O₂, N₂, H₂, ...

I.5. transfert thermique

L'enthalpie de formation des fluides cryogéniques est faible, la capacité thermique massique des matériaux tend vers zéro, la conséquence immédiate est que toute entrée de chaleur va entraîner une évaporation notable des fluides cryogéniques et/ ou des échauffements importants

La connaissance des caractéristiques à basse température des processus de Transfert thermique nécessite donc une approche particulière [7], [9]

I.5.1. Conduction

C'est le procédé de transfert de chaleur à l'intérieur de la matière sans transfert de masse. Il est décrit par la loi de FOURIER

$$\varphi' = -K S \frac{dt}{dx}$$

Avec φ' : flux de chaleur en W passant à travers la section S en m² au gradient de température dt /dx.

La conductivité thermique K en W/m.K est une propriété extrêmement importante en cryogénie : dans certains cas, il faut qu'elle soit très bonne (contact thermique) et, dans d'autres il faut qu'elle soit particulièrement faible pour éviter les transferts de chaleur parasites (isolement des cryostats)

I.5.2. Convection

C'est le transfert d'énergie thermique par déplacement macroscopique de matière. On peut écrire

$$\varphi' = h_c \cdot S (T_p - T_f)$$

Avec : h_c : coefficient de convection en W/m².K

S : surface d'échange en m²

T_p : température de la paroi en K

T_f : température du fluide loin de la paroi en K

I.5.3. Rayonnement

Le rayonnement que l'on considère à basse température est essentiellement de très grande longueur d'onde. C'est-à-dire dans l'infrarouge lointain. Le maximum d'énergie spectrale émise correspond en effet à des longueurs d'onde qui vont de 9.65 Nm à température ordinaire à 725 Nm à 4 K.

L'énergie W_R émise par rayonnement d'une surface A est donnée par l'équation de STEFAN BOLTZMANN :

$$W_R = \sigma \cdot e \cdot A \cdot T^4$$

Avec :

W_R : énergie rayonnée exprimée en Watts.

e : pouvoir émissif de la surface A .

σ : Constante de S. B : $5,67 \cdot 10^{-12} \text{ W.cm}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T : température en K

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures T_1 et T_2 ($T_2 > T_1$) s'écrit :

$$W_R = \sigma \cdot E \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Avec :

A_1 : aire en cm^2 de la surface qui reçoit l'énergie à température T_1 .

E : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs e_1 et e_2 des surfaces aux températures T_1 et T_2 .

I.6. Stockage cryogéniques

Les liquides sont stockés dans les réservoirs cryogéniques à basse pression suivant la température du produit. Ils sont installés tout près de leur unité de Production et sont dotés de pompe pour remplissage des citernes cryogéniques.

Les réservoirs de stockage sont disposés en face d'un espace pour permettre aux camions citernes de faire les manœuvres nécessaires pour être en position idéale de remplissage, et Près de la mer pour de faciliter le processus de pompage du produit dans les navires.

❖ Les réservoirs adaptés au stockage cryogénique

Les réservoirs cryogéniques utilisés pour stocker les fluides cryogéniques, appelés quelque fois cryostats, sont des systèmes à double paroi métallique avec une isolation au sein de cette double paroi.

Le stockage cryogénique, grâce à sa faible pression de travail comparée à celle des systèmes haute pression, permet de réduire le poids et améliorer les performances de ces systèmes en utilisant des nouveaux matériaux composites. Avec de tels systèmes, l'énergie massique spécifique stockée peut être similaire à celle de réservoirs traditionnels de carburant.

Cependant une grande attention doit être portée au design du réservoir afin d'assurer la protection contre tout échange possible de chaleur, et empêcher ainsi l'évaporation de d'azote (phénomène de « boil-off »). Ce phénomène ne peut être évité, mais seulement minimisé. [10]

❖ Isolation des réservoirs de Stockage

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus importante que L'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques est faible. Pour isoler les réservoirs cryogéniques, on dispose d'un nombre important de matériaux isolants.

La conductivité thermique du matériau étant un facteur prépondérant ainsi que d'autres Critères doivent aussi être examinés pour le choix d'un isolant : la facilité de mise en œuvre, la durée de vie, la fiabilité de l'isolation réalisée, le prix, l'inflammabilité, la masse, les caractéristiques mécanique, les caractéristiques physiques, etc.

Pour l'isolation des réservoirs cryogéniques, le choix de l'isolant dépend souvent de la taille du réservoir (plus le réservoir est petit, plus les caractéristiques thermiques doivent être bonnes).

Le super isolant est toujours retenu pour les réservoirs de moins de 1000 L de capacité destinés aux fluides tels que l'azote, l'oxygène, l'argon.

En ce qui concerne le stockage de l'hélium et de l'hydrogène liquides, la super isolation est pratiquement obligatoire. [6]

I.7. Domaine d'utilisation de la cryogénie

De très nombreuses branches d'activité scientifiques et techniques utilisent actuellement la cryogénie [7] :

- les sciences physiques étudient des phénomènes spécifiques des basses température sou qui exigent d'y travailler : supraconductivité, physique nucléaire, magnétisme, technique des gyroscopes de haute précision, électronique appliquée, etc.
- l'industrie chimique fait un usage croissant de l'oxygène pour les réactions et surtout de l'azote pour l'inertage des atmosphères. La production en quantité massive de l'éthylène ne peut se faire qu'à l'aide des basses températures pour sa séparation et sa purification finale.
- La biologie utilise le froid pour conserver divers produits (par Lyophilisation), pour la préparation de produits pharmaceutiques et pour de nombreuses autres opérations.
- La médecine et la chirurgie emploient depuis longtemps des produits de base préparés grâce à la cryogénie : oxygène, protoxyde d'azote, plasma sanguin, etc.
- Les liquides cryogéniques usuels tels que l'oxygène et l'azote et les gaz rares de l'air sont employés en quantités massives dans la sidérurgie et la métallurgie (notamment argon/hélium pour la soudure)
- Quant aux industries spatiales, on sait que l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et l'hélium liquide sont à la base même de leur existence. l'oxygène et l'hydrogène liquides assurent la propulsion des fusées, l'azote et l'hélium sont indispensables pour assurer l'inertage et le bon fonctionnement notamment des pompes d'alimentation à grand débit des moteurs de fusées.

L'utilisation du froid pour le traitement, la production ou la transformation des gaz constitue donc actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne.

I.8. Importance et utilisation des gaz liquéfiés [11]

L'obtention et l'utilisation des gaz liquéfiés répondent à trois besoins essentiels:

- obtention de gaz purs à partir d'un mélange de gaz.
- facilité et économie de transport des gaz.
- usage des basses températures.

I.8.1. Obtention des gaz purs

Le but initial de la liquéfaction des gaz était la séparation des mélanges gazeux et l'obtention de gaz pur.

Les travaux des premiers chercheurs s'appliquaient à la séparation des fractions gazeuses de l'industrie chimique, par ailleurs, ils cherchaient également à séparer les composants de l'air (Oxygène, azote, gaz rares).

- L'importance de gaz pur :
 - Lois d'ébullition des fluides purs
 - Sous une même pression, le liquide pur commence toujours à bouillir à la même température.
 - Pendant toute la durée de l'ébullition, la température reste constante si la pression reste constante.
 - Lois de condensation des fluides purs
 - Sous une même pression, la vapeur commence toujours à se condenser à la même température.
 - Pendant toute la durée de la condensation, la température reste constante si la pression reste constante.

I.8.2. Facilité et économie du transport

Le transport des gaz à moyenne distance dans les canalisations ne se justifie que pour des débits importants assurés en des points bien déterminés, avec une certaine permanence dans le temps.

Pour le gaz naturel, par exemple, son transport par gazoduc est rentable pour des parcours terrestres où les débits sont importants et permanents. Pour les parcours maritimes on se heurte alors à des difficultés sérieuses : les pipes sous-marines sont très coûteuses et sont exposées à de hauts risques. Pour les autres gaz tels que l'oxygène et l'azote, par exemple, ils sont livrés par petites quantités, il n'est pas possible d'installer des canalisations de distribution. Ces gaz sont généralement livrés à l'état comprimé à 150 bar dans des bouteilles en acier. En raison de la grande épaisseur de ces bouteilles appelées à résister à une pression intérieure assez élevée, on obtient, alors, un poids important, la bouteille vide pèse 70 à 90 kg pour une charge utile de gaz inférieure à 10 kg.

Ceci a l'inconvénient du transport d'un poids mort de 7 à 9 fois supérieur à la charge utile entre le lieu de production et le lieu d'utilisation.

La solution la plus intéressante de nos jours consiste à liquéfier les gaz et à les transporter à l'état liquide par mer, par route ou par rail.

En effet, sous l'état liquide, un gaz occupe un volume environ 600 fois moindre que celui qu'il occupe à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression.

Au point d'arrivée, les gaz sont regazéifiés pour être distribués à la consommation. Le gaz naturel, par exemple, est regazéifié puis distribué par canalisations.

L'oxygène et l'azote arrivent à l'état liquide aux centres de conditionnement où ils sont regazéifiés et mis en bouteilles pour la distribution à courte distance.

I.8.3. Usage des basses températures

Sous certaines conditions, la plupart des gaz ont des températures de condensation inférieures à la température ambiante et même inférieures à 0°.

Les gaz liquéfiés peuvent donc se trouver à de basses températures et les applications y sont nombreuses. Outre l'utilisation des gaz liquéfiés pour les besoins de la réfrigération et de la Climatisation, leur usage est également important dans l'industrie et dans les laboratoires de Recherche Où on a besoin d'effectuer des opérations et des expériences diverses à très basse température.

Chapitre II

Les cycles de la liquéfaction

II.1. Définition de la réfrigération et de la liquéfaction

II.1.1. La réfrigération

La réfrigération d'un système consiste à en extraire de l'énergie, cette énergie peut être reçue de l'extérieur et dissipée dans le système. On opère souvent dans ce cas à température constante. Par contre, la liquéfaction consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir de puis la température ambiante jusqu'à son point de rosée, puis à condenser la vapeur saturée.

II.1.2. La liquéfaction

La liquéfaction est un changement d'état qui fait passer un corps de l'état gazeux à l'état liquide. Elle est la transformation inverse de la vaporisation. Bien qu'incorrect selon la terminologie de la thermodynamique, le terme condensation (liquide) est couramment utilisé à la place. Elle peut se produire par compression ou refroidissement d'un gaz. La première industrialisation du procédé est due à Carl von Linde. [14]

Exemples de gaz liquéfiés : hélium liquide $-268,93^{\circ}\text{C}$, hydrogène liquide $-252,76^{\circ}\text{C}$, néon liquide $-246,053^{\circ}\text{C}$, azote liquide $-195,79^{\circ}\text{C}$, oxygène liquide $-182,96^{\circ}\text{C}$, gaz naturel liquéfié (composé essentiellement de méthane $-161,52^{\circ}\text{C}$) et gaz de pétrole liquéfié (composé essentiellement de propane $-42,1^{\circ}\text{C}$ et de butane $-0,5^{\circ}\text{C}$).

La liquéfaction des gaz a lieu :

- Pour réduire leur volume et donc mieux les stocker et les transporter.
- Pour les utiliser dans les différents domaines de la cryogénie.

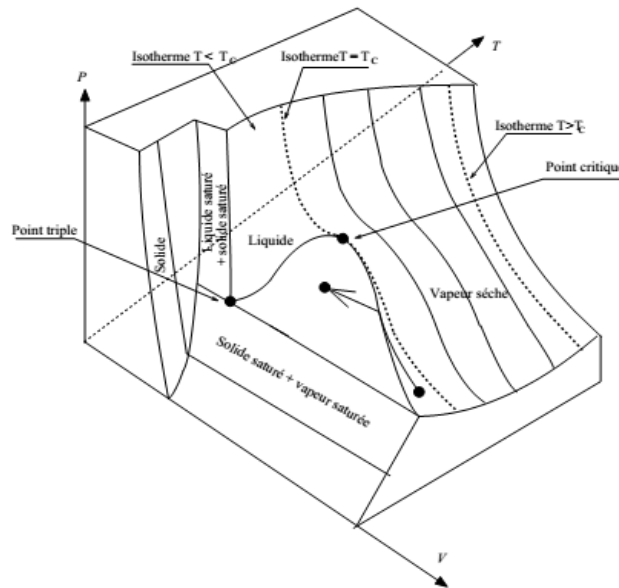


Figure II-1 : diagramme P-V de changement de phase

II.2. Propriétés de l'air

Les gaz de l'air, plus communément appelés « gaz industriels » font partie de notre vie quotidienne et concernent toutes les industries.[33]

Peu de temps après 1895, deux méthodes développées en parallèle par CARLVAN LINDE et GEORGES CLAUDE ont abouti à la production industrielle d'air liquide puis d'azote et d'oxygène.

L'air que nous respirons est majoritairement constitué d'azote (78.09%), d'oxygène(20.95%)et d'argon(0.93%), l'observation des caractéristiques physiques et l'application du principe de détente des gaz ont permis la liquéfaction de l'air , puis la séparation de ses principaux composants ,en effet, l'azote, l'oxygène et l'argon ont une température de liquéfaction différente . il est donc possible de les séparer par distillation fractionnée .on peut ainsi obtenir des séparations très efficaces et des gaz de grande pureté.

L'air en tant que mélange de gaz et ses composants($H_e, H_2, N_e, N_2, CO, Ar, O_2, CH_4, Kr$)
L'air en tant que mélange de gaz et ses composants

Dans un langage scientifique, on dirait « tout gaz dont la température critique est inférieure à la température ambiante »

Nom et symbole		Point critique	
		T [°C]	P[bar]
Hélium	He	-267.95	2.275
Hydrogène	H ₂	-239.91	12.38
Néon	Ne	-228.75	27.56
Azote	N ₂	-146.95	34.00
Air		-140.73	37.74
Monoxyde de carbone	CO	-140.24	34.99
Argon	Ar	-122.00	48.98
Oxygène	O ₂	-118.57	50.43
Méthane	CH ₄	-82.62	45.96
Krypton	Kr	-63.75	55.02

Tableau II.1 : conditions critiques des gaz permanents

II.2.1. Propriétés et utilisations de l'azote [80]

L'azote est un gaz dans les conditions ordinaires 15 °c et 760 mmHg. L'azote est un gaz incolore, sans odeur et sans saveur. C'est le composant principal de l'air (78.08 % en volume)

A la pression atmosphérique, pour des températures à – 196°c ; c'est un liquide incolore, un peu plus léger que l'eau.

L'azote ne peut entraîner ni la respiration, ni la combustion, mais joue un rôle essentiel en tant qu'élément de la matière. C'est un gaz ininflammable.

L'azote est livré soit gazeux sous pression dans des bouteilles, soit liquide à basse température sous sa propre pression de vapeur saturante.

Propriétés physiques:

- Formule chimique N₂
- Numéro atomique Z= 7
- Masse molaire 28.0134 g / mole

Propriétés biologiques :

- L'azote est un gaz physiquement inerte, non toxique. Par déplacement de l'oxygène de l'air, il peut avoir des effets nocifs sur l'organisme en réduisant la pression partielle de l'oxygène dans les poumons et agir comme asphyxiant.

II.2.2. Domaines d'utilisation des gaz industriels

Les domaines d'utilisation des gaz industriels sont donnés dans le tableau suivant :

Domaine d'activité	Exemples d'application	Apport des gaz industriels	Principaux gaz utilisés
Soudage/Coupage	Fabrication de produits Mécano soudé	Amélioration de la productivité, de la qualité D'assemblages et du confort opératoire	Acétylène Argon Azote Oxygène
Laboratoire	Analyses sur des appareils de mesure : absorption atomique, torche plasma, chromatographie ...	Fiabilité des analyses grâce à des étalonnages de précision	Argon Azote Gaz purs & Mélanges Oxygène
Agro-alimentaire	Surgélation, enrobage de produits IQF (Individual Quick Frozen produits alimentaires surgelés individuellement), refroidissement, préparation De charcuteries, plats cuisinés.... Protection des jus de fruits	Augmentation de la DIC (date limite de consommation), préservation des qualités aromatiques, gustatives et physiques des aliments	Azote Dioxyde de carbone

Environnement	Piégeage des COV (composés organique volatils), refroidissement des fluides procès, neutralisation des effluents, dopage des stations d'épuration	Optimisation des installations (stations d'épuration par exemple), respect de l'environnement	Azote Dioxyde de carbone Oxygène
Chimie	Inertage, ébavurage, cryobroyage	Sécurilisation des installations, transferts sous gaz inerte, finition des pièces coût choc et plastique, micronisation	Azote Dioxyde de carbone
Métallurgie	Production d'atmosphères pour le traitement thermique, dopage des fours verriers, Inertage des composants électroniques pour le brasage	Amélioration des propriétés mécaniques des pièces Augmentation de la productivité Protection contre l'oxydation des composants	Azote Hydrogène Oxygène

Tableau II.2 : Domaines d'utilisation des gaz industriels

II.3. Comment réaliser la liquéfaction des gaz

Nous savons que la matière se présente sous trois états solide, liquide et gazeux La distinction entre ces états étant basée sur :

- La distance entre les particules (atomes, molécules, ions) qui constituent la matière
- L'agitation de ces particules.

Les particules à l'état gazeux sont très éloignées les unes des autres, avec une agitation rapide et désordonnée. On observe également de nombreux chocs entre elles.

Pour l'état liquide, les particules sont beaucoup plus rapprochées les unes des autres, Elles se déplacent à faible vitesse donnant lieu à des associations temporaires (liaisons faibles).

A l'état solide, les particules sont empilées dans un ordre régulier, elles sont très rapprochées les unes des autres.

Sur ces bases, on pourra dire que le passage de l'état gazeux vers l'état liquide pourra s'effectuer par la diminution de la distance entre les particules (rapprochement) et par le ralentissement du déplacement de ces particules et on peut réaliser cela :

- Par la compression : l'augmentation de la pression exercée sur le gaz diminue le volume offert au gaz et rapproche les particules entre elles.

Cependant, l'agitation des particules demeure importante et la température s'élève à cause des chocs. Il faudra donc abaisser la température.

- Et par l'abaissement de la température : la diminution de température extrait de l'énergie calorifique du milieu et ainsi l'énergie cinétique des particules se trouve réduite et les particules se déplacent moins vite.

Le rapprochement conjugué au ralentissement permet l'établissement de liaisons entre particules : ce qui provoque **la formation du liquide**

Conclusion : d'après ce qui précède, on voit qu'un gaz peut être liquéfié si on le comprime tout en abaissant sa température.

II.4. production des la bases température

II.4.1. La détente Joule-Thomson (J-T) [5], [35]

C'est une détente isenthalpique sans travail extérieur ce type de détente qui est le premier mode fondamental de production du froid, se produit par passage d'un gaz réel dans un orifice étroit, les échanges de chaleur avec l'extérieur étant supprimés par un calorifuge.

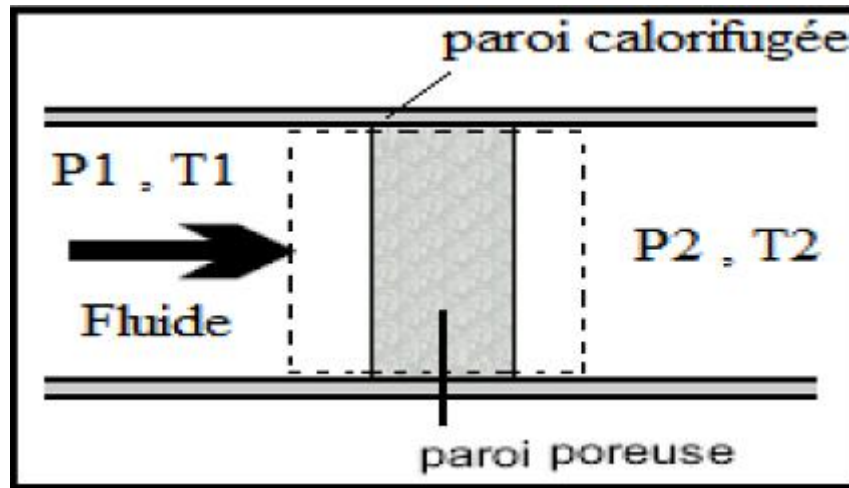


Figure II-2 : Détente de joule Thomson. [20].

Soit une masse de gaz unité qui s'écoule à travers un orifice. La pression passe P_1 à P_2 et le volume de V_1 à V_2

Le travail est :

$$W = P_2V_2 - P_1V_1$$

La chaleur échangée avec l'extérieur est nulle par hypothèse ($Q=0$).

La variation d'énergie interne est alors :

$$U_2 - U_1 = -W = P_1V_1 - P_2V_2$$

$$U_2 + P_2V_2 = U_1 + P_1V_1$$

$$H_2 = H_1$$

L'enthalpie du gaz n'a pas donc varié, la détente JOULE THOMSON est isenthalpique $dH=0$.

L'abaissement de température en fonction de la pression peut être caractérisé par un coefficient μ_{j-T} tel que $\mu_{j-T} = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_h$ coefficient JOULE -THOMSON qui se calcule comme suit :

$$dH = d(U + PV) = dU + PdV + VdP = 0$$

Ce coefficient est une mesure de la variation de la température avec la pression durant un processus isenthalpique (c'est aussi la pente de la courbe $h=cste$ dans le diagramme T-P).

A partir de la figure, III-12 nous constatons que

- $\mu_{j-T} < 0$ détente avec augmentation de la température ($T_2 > T_1$).
- $\mu_{j-T} = 0$ détente sans variation de température ($T_2 = T_1$).
- $\mu_{j-T} > 0$ détente avec diminution de température ($T_2 < T_1$).

La courbe d'inversion de l'effet joule Thomson regroupe l'ensemble des points maximums des isenthalpiques, elle est donc donnée par la relation $\mu_{j-T} = 0$. Il est tout à fait claire (fig.II.1) qu'un effet de refroidissement par détente de joule – Thomson ne peut avoir lieu que si le fluide est en dessous de la température d'inversion maximale notée T_{inv} :

- Si $T_1 > T_{inv}$ alors $T_2 > T_1$ (réchauffement du fluide).
- Si $T_1 < T_{inv}$ alors $T_2 < T_1$ (refroidissement du fluide).

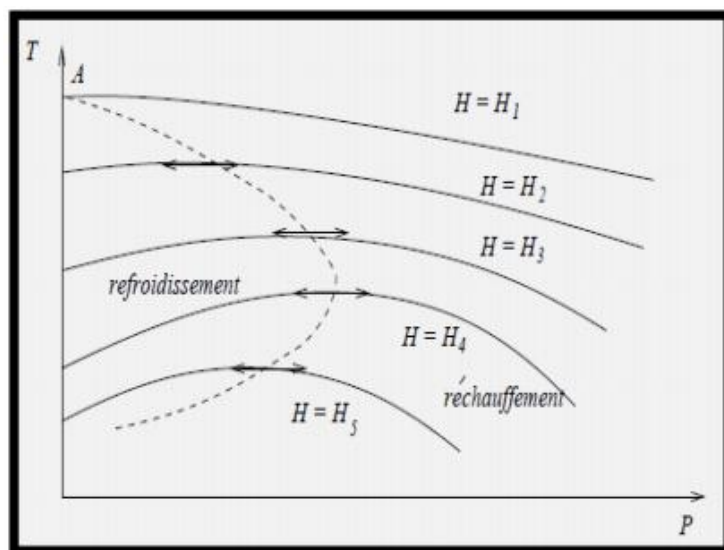


Figure II-3 : les lignes isenthalpiques et les points d'inversion dans le diagramme(T-P)

Les courbes $T = f(P)$ passent par un maximum nommé point d'inversion.

La courbe en pointille réunissant les points de pente nulle est appelée la courbe d'inversion.

$$\mu_{j-T} = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_h = 0$$

A l'intérieur de la courbe d'inversion, est positif : une diminution de la pression entraîne une diminution de la température

II.4.2. La détente adiabatique

La deuxième méthode pour produire les basses températures ; c'est la détente adiabatique du gaz à travers une machine d'expansion, pour ce cas idéal la détente est réversible et adiabatique (isentropique) , on définit alors un coefficient de détente isentropique

$$\mu_s = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_s$$

On pouvait d'ailleurs s'y attendre car le travail produit par le système est, en vertu du principe de l'équivalence compensé par diminution d'énergie interne, donc de la température.

La détente isentropique, pour une même température de départ et entre deux pressions données, provoque un abaissement de température plus important que la détente isenthalpique.

Elle est donc plus intéressante, mais son emploi est toujours combiné avec celle-ci car il n'est pas possible, pour des raisons technologiques, d'admettre la présence de liquide dans les machines de détente.

II.5. Les différents types de systèmes de liquéfaction

Pour les gaz dont la température critique est inférieure à la température ambiante les premiers essais de liquéfaction furent réalisés par Cailletet (France) et Pietet (Suisse) en 1877. En 1895, Linde réussit à fabriquer pour la première fois de grandes quantités d'air liquide. La machine de Linde sera perfectionnée par Claude en 1905. Ces machines utilisent des cycles à détente

On peut distinguer trois grandes familles de procédés thermodynamiques cryogéniques ($T < 125\text{K}$)

- ❖ Les procédés à détente isenthalpique de Joule-Thomson
- ❖ Les cycles inverses de Brayton à détente isentropique
- ❖ Les procédés mixtes associant une détente isenthalpique et une détente isentropique (cycle de Claude)

II.5.1. Cycle de Linde pour la liquéfaction des gaz

II.5.1.1. Principe de fonctionnement

Ce cycle comporte un refroidissement préliminaire permettant d'abaisser la température du gaz sous la température d'inversion de Joule-Thomson. Cette température reste néanmoins supérieure à la température critique et ne permet donc pas la liquéfaction du gaz.

Le gaz est ensuite détendu selon le processus de Joule-Thomson permettant d'atteindre une température inférieure à la température critique.

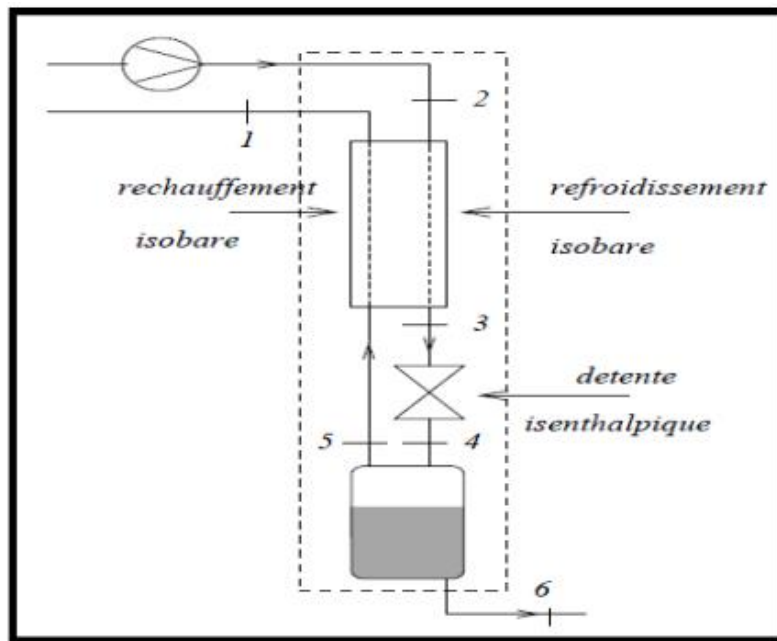


Figure II-4 : Cycle du Linde.

II.5.1.2. Diagramme P-V pour cycle de Linde

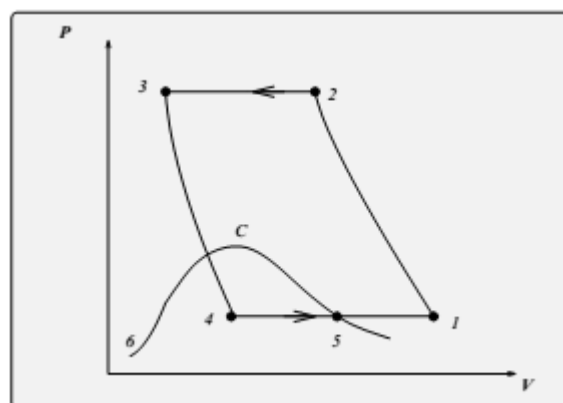


Figure II-5 : Cycle de Linde : diagramme T-S

II.5.1.3. Diagramme T-S pour cycle de Linde

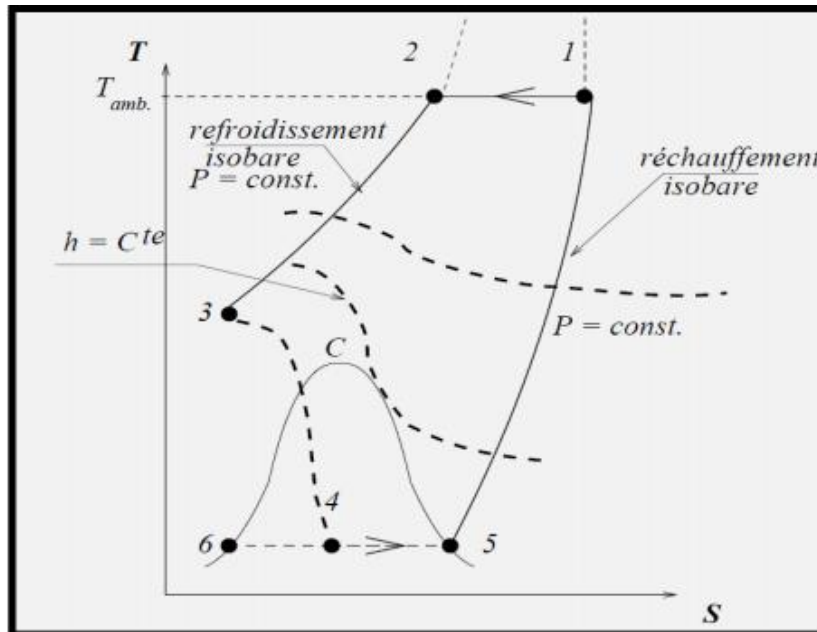


Figure II-6 : Cycle de Linde : diagramme T-S

1 \Rightarrow 2 : compression isotherme3 \Rightarrow 4 : détente isenthalpique2 \Rightarrow 3 : refroidissement isobare5 \Rightarrow 1 : réchauffement isobare

du gaz non liquéfié

II.5.2. Cycle de liquéfaction avec travail extérieur : Cycle de Brayton inverse

Dans le cycle de Linde, le refroidissement isenthalpique est obtenu au cours d'une détente sans production de travail. On peut imaginer de refroidir le gaz en actionnant une turbine et donc, de fournir en même temps du travail. Si l'on veut se rapprocher d'un cycle idéal (amélioration du rendement), le gaz doit être détendu dans une turbine idéalement réversible. La substitution de la vanne de laminage par une turbine reviendrait à faire fonctionner la turbine en milieu humide, ce qui d'un point de vue technologique est impossible. On ne peut utiliser la turbine que dans une zone de température plus élevée (détente sèche). On obtient alors le cycle de Brayton qui fournit du travail mais ne génère pas de liquide.

- Comparaison des cycles de Linde et de Brayton inverse

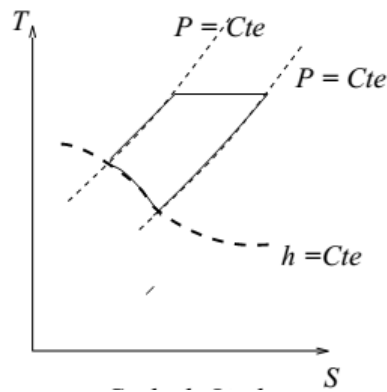


Figure II-7 : Cycle de Linde

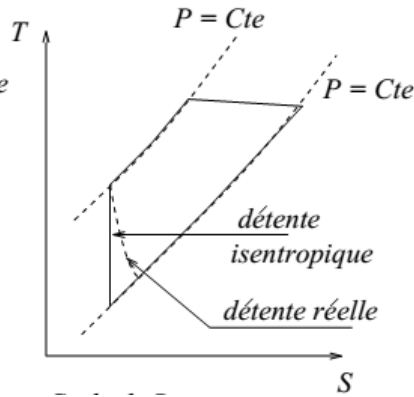


Figure II-8 : Cycle de Brayton inverse

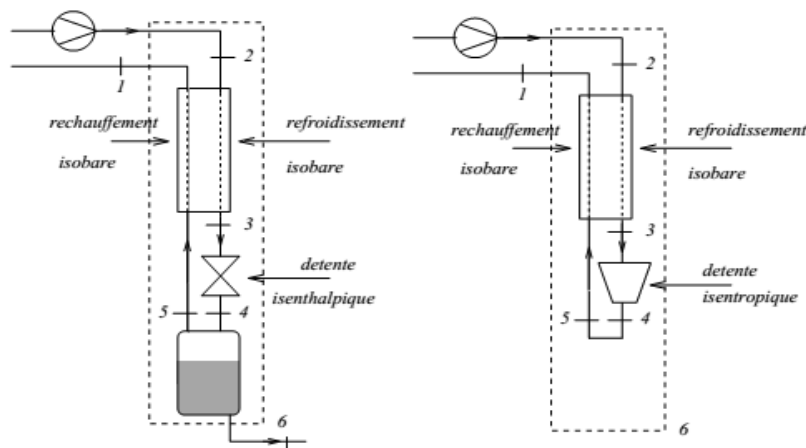


Figure II-9 : Schéma de cycle de Linde et de cycle de Brayton inverse

II.5.3. Cycle de Claude pour la liquéfaction

II.5.3.1 Principe de fonctionnement [29]

Le cycle de Claude a perfectionné le processus de liquéfaction de l'air en associant l'utilisation d'une machine de détente et d'une vanne à effet Joule-Thomson.

Ce cycle comprend comme illustre la figure 4.1 :

- un compresseur
- Un premier échangeur de chaleur, à la suite duquel une fraction importante du gaz à haute pression passe dans une machine de détente et est envoyé vers le gaz à basse pression.

- Un deuxième et un troisième échangeur, dans lesquels passe le reste du gaz à haute pression.
- Une vanne de détente.
- Un réservoir de liquide avec séparation du gaz qui retourne au compresseur à travers les trois échangeurs.
- Une entrée du gaz frais au compresseur.
- Une extraction du liquide

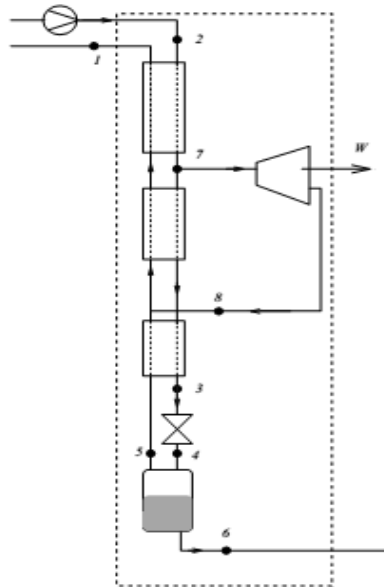


Figure II-10 : Schéma de principe de cycle de Claude

II.5.3.2. Diagramme T-S pour cycle de Claude

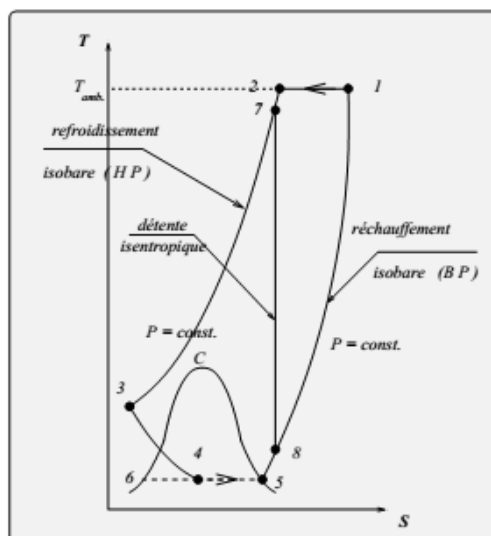


Figure II-11 : Diagramme (T-S) de cycle de Claude

L'objectif de la turbine est double :

- Provoquer un refroidissement important du gaz (point 8), qui permettra par l'intermédiaire d'un échangeur de refroidir, le gaz issu de la compression isotherme (1-2).
- Produire du travail mécanique.
 - Fonctionnement :

La totalité du gaz issu du compresseur, est refroidit dans un premier échangeur (2-7). Le gaz est séparé en deux fractions. Une fraction x de ce gaz est envoyée dans la turbine (7-8). En sortie de la turbine, le gaz (refroidi et détendu) rejoint l'étage BP de l'échangeur. Il refroidit alors la fraction $(1 - x)$ de gaz dirigée vers le liquéfacteur.

II.6. Equipements utilisés [80]

II.6.1. Compresseurs cryogéniques

Les compresseurs cryogéniques peuvent être volumétriques (alternatifs ou rotatifs) ou à impulsion (centrifuges) deux contraintes sévères nous obligent de faire un bon choix d'un type par rapport à un autre.

- 1) le processus de compression qu'il soit le plus possible isotherme.
- 2) et doit se faire sans polluer le gaz afin de ne pas boucher les échangeurs.

Les compresseurs alternatifs secs ; sont chers et peu fiables et les compresseurs lubrifiés, qui ont une grande fiabilité mais polluent les gaz par de l'huile.

Le développement de systèmes de séparation d'huile très performants a permis d'utiliser le compresseur à vis lubrifié, dans lequel la grande quantité d'huile injectée permet d'obtenir une compression isotherme. Ce type de compresseur est très fiable (jusqu'à 40000 h sans entretien) car le nombre de pièces en mouvement est faible. Il équipe maintenant la quasi – totalité des réfrigérateurs de conception moderne la grande quantité d'huile injectée dans un compresseur à vis doit être séparée dans un système de déshuilage.

Pour des débits volumétriques de fluides cryogéniques importants (jusqu'à 300 l/s) on recommande les compresseurs centrifuges qui ont l'avantage de supporter les grandes vitesses (40000 à 100000 tr/min) et ne pas apporter de pollution.

II.6.2. Les échangeurs de chaleur

Mis à part les appareils de laboratoire, dont certains utilisent des échangeurs bobinés, les réfrigérateurs modernes sont construits avec des échangeurs à plaques ailettes en alliage d'aluminium, qui sont compacts et efficaces



Figure II-12 : Echangeur cryogénique principale bobinés

II.6.3. Les régénérateurs

Le régénérateur est destiné à stocker momentanément la chaleur cédée par le fluide haute pression s'écoulant de la température ambiante T_c à la température froide T_f avant de la restituer à ce fluide repassant de T_f à T_c après détente. Il joue un rôle essentiel dans l'efficacité d'un cryoréfrigérateur à flux alterné, idéalement, ce régénérateur devrait avoir :

- Une capacité thermique infinie par rapport à celle du fluide cryogénique pour limiter ses oscillations en température, lors des alternances de flux.
- Une conduction thermique nulle longitudinalement pour empêcher les apports de chaleur parasite par conduction du bout chaud au bout froid.
- Une conduction thermique infinie dans le sens radial pour assurer une bonne diffusivité thermique lors des échanges ;
- Un volume mort minimal (c'est-à-dire une porosité faible) ;

- Une perte de charge minimale à l'écoulement du fluide cryogénique (transparence élevée) afin de limiter l'énergie de compression non utile au cycle

II.6.4. Les détenteurs cryogéniques

a) Le détendeur alternatif :

Fut la première de détente utilisée. Il est encore apprécié par les opérateurs de petits appareils de laboratoire qui peuvent en assurer facilement l'entretien. Sa vitesse de rotation est limitée à 300 tr/ min .lorsque la débit volumétrique à traiter augmente, il devient rapidement impossible d'augmenter la cylindrée et la vitesse de rotation. Seule la turbine permet d'apporter la fiabilité et l'efficacité requises.

b) Les turbines à paliers à gaz hydrostatiques ou hydrodynamiques :

A paliers statiques, elles sont alimentées par un faible débit de gaz haute pression (environ 4 % du débit de cycle) et ont, de ce fait, une force sustentation importante et indépendante de la vitesse de rotation.

Les paliers dynamiques, qui n'ont pas à être alimentés supportent mal les variations rapides des conditions de fonctionnement et ont force de sustentation décroissante avec la vitesse de rotation.

La technologie actuelle des paliers à gaz est bien adaptée à la réfrigération. Les paliers statiques permettent d'atteindre des puissances extraites dans la gamme des 100 KW, autre fois réservée aux seules turbines à paliers à l'huile.

II.6.5. Autres composants

Les autres composants particuliers qui constituent un liquéfacteur ou réfrigérateur sont :

- Les vannes cryogéniques.
- Les adsorbants : il est possible que, pendant de longues périodes de fonctionnement, des fuites se déclarent. Les quantités d'impuretés, même à des concentrations très faibles peuvent alors provoquer le bouchage des circuits.

Pour pallier cet inconvénient, une capacité remplie de matériau adsorbant est intercalée dans le circuit haute pression à une température permettant de piéger les impuretés.

II.7. Performances des cycles de liquéfaction [80]

a) Température limite :

Pour les machines à faible puissance, l'importance des entrées parasites de chaleur peut affecter très sensiblement la température limite.

- Machines à flux continu :

La limite des machines de Joule Thomson ou de Claude est donnée par la température d'ébullition du fluide cryogénique utilisé qui est à la base pression du cycle, autour de 4.5 K pour l'hélium. La compression cryogénique permet d'atteindre des températures inférieures à 1.7 K.

- Machines à flux alterné :

La limite minimale atteinte avec des machines à flux alterné est limitée par la perte d'efficacité du régénérateur aux basses températures. L'utilisation de plusieurs étages de détente et de régénération permet d'évacuer une charge thermique à une température intermédiaire. Les machines à un seul étage avec régénérateur en laiton ou en acier inoxydable permettent d'atteindre 30 K, l'adjonction d'un second étage de régénération en plomb reporte la limite au voisinage de 10 K.

b) Puissance frigorifique

- Machine à flux continu :

Elles sont utilisées pour les fortes puissances de réfrigération, en particulier les machines de Baryton et de Claude. Les domaines d'utilisation des machines à flux continu sont :

- La liquéfaction d'hélium pour laboratoire : de 5 à 200 L/h
- La liquéfaction d'hélium en sortie des installations d'extraction : de 500 à 3000 L/h ;
- La liquéfaction d'hydrogène : de 500 à 40 000 L/h ;
- La réfrigération en circuit fermé à environ 4.5 K : de 20 à 20 000 W.
- La réfrigération à environ 20 K : de 200 à 20 000 W.

Pour les très faibles puissances, les machines de Joule –Thomson sont utilisées à 80 K malgré leur faible rendement mais à cause de leur simplicité. Associées à des machines à régénérateur elles permettent aussi d'atteindre 4.5 K dans un encombrement réduit pour refroidir des systèmes A faibles pertes. Les machines de Bray ton sont peu adaptées aux faibles puissances ($< 1W$ à 10K et $< 100W$ à 100K), En particulier à cause de la masse et de l'encombrement des compresseurs et détendeurs alternatifs, De la difficulté de miniaturiser les turbines de détente en conservant un rendement acceptable

- Machine à flux alterné

Elles sont principalement utilisées pour des puissances inférieures à 5W à 10K et 500W à 100K.

Le domaine des fortes puissances est pratiquement interdit aux cycles à régénération car l'augmentation de la cylindrée et de la fréquence de fonctionnement est limitée, le volume et la masse du régénérateur deviennent vite problématiques

Chapitre III

Étude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'azote

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

III.1. Rappel thermodynamique

III.1.1. premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert

La variation d'énergie totale d'un système ouvert résulte des échanges d'énergies avec le milieu extérieur :

$$\Delta E_T = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = \varphi + W_t + \Delta U_{ij} + \Delta E_{ij} + \Delta E_{P_{ij}} + \Delta W_{t_{ij}}$$

- Energie interne : $\Delta U_{ij} = \sum_i U_i - \sum_j U_j$
- Energie cinétique : $\Delta E_{C_{ij}} = \sum_i \frac{1}{2} m_i C_i^2 - \sum_j \frac{1}{2} m_j C_j^2$
- Energie potentielle : $\Delta U_{P_{ij}} = \sum_i m_i g z_i - \sum_j m_j g z_j$

$$\Delta E_T = \varphi + W_t + \sum_i \left(U_i + \frac{1}{2} m_i C_i^2 + m_i g z_i + P_i V_i \right) - \sum_j \left(U_j + \frac{1}{2} m_j C_j^2 + m_j g z_j + P_j V_j \right)$$

Si en introduit l'enthalpie : $H = U + PV$

$$\Delta E_T = \varphi + W_t + \sum_i \left(H_i + \frac{1}{2} m_i C_i^2 + m_i g z_i \right) - \sum_j \left(H_j + \frac{1}{2} m_j C_j^2 + m_j g z_j \right)$$

De plus, si on note par : $h_t = H + C^2 + gz$

Enthalpie totale par unité de masse

$$\Delta E_T = \varphi + W_t + \sum_i m_i (h_T) + \sum_j m_j (h_T)$$

On divisant par « dt » on obtient

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\varphi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

\dot{E}_t : Puissance totale échangée avec le milieu extérieure

$\dot{\varphi}$: Puissance thermique échangée avec le milieu extérieure

\dot{W}_t : Puissance technique échangée avec le milieu extérieure

$\dot{m}_i \dot{m}_j$: Débit massique de fluide

On considérant un régime permanent

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$$

D'où

$$\dot{\phi} + \dot{W}_t = \dot{m}(h_{Ts} - h_{Te}) = \dot{m}\Delta h_T$$

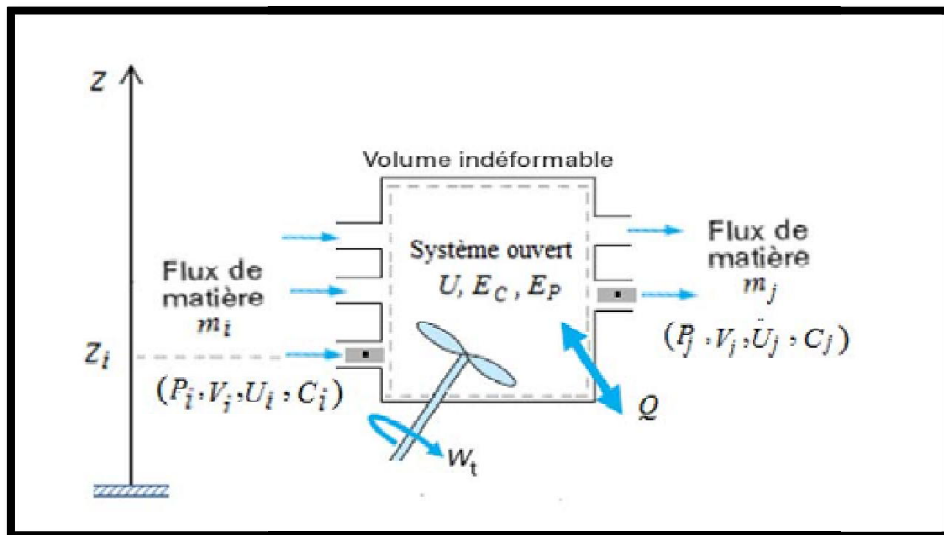


Figure III.1 : système thermodynamique en régime permanent

III.2. Bilan énergétique du cycle de la liquéfaction

III.2.1. Cycle de Linde

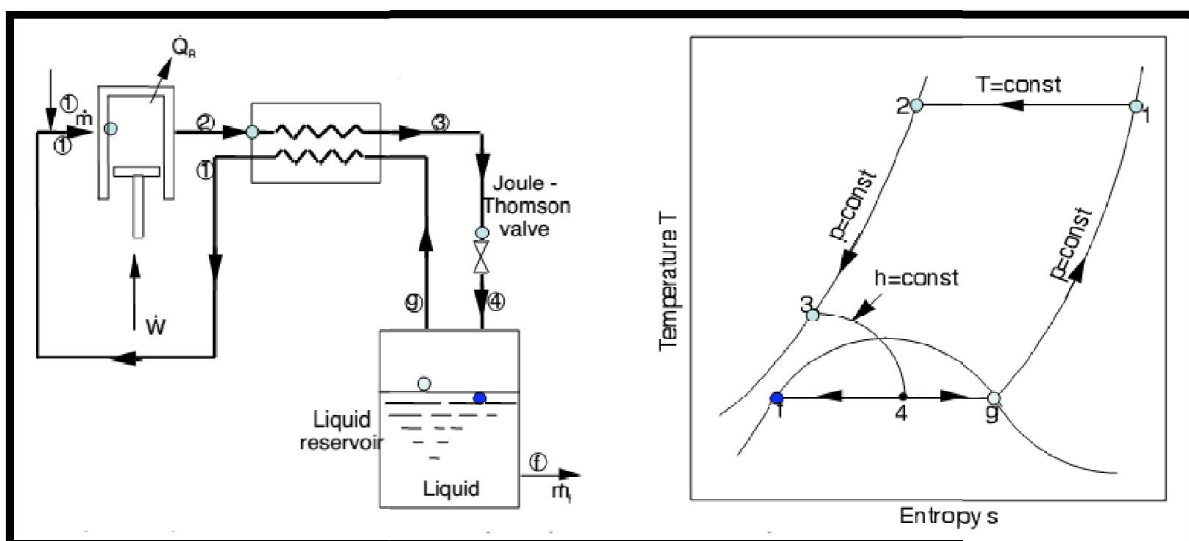


Figure III.2 : schéma de cycle de Linde et le diagramme T-S

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

a- Compresseur

On appliquant le premier principe de la thermodynamique sur le compresseur :

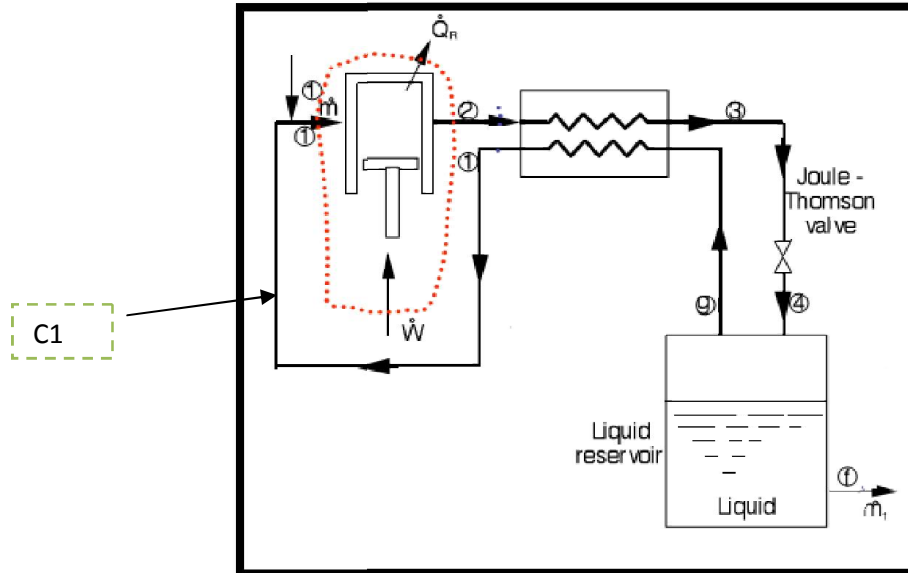


Figure III.3 : volume de contrôle C1

On considérant un régime permanent : $\dot{E} = \dot{S}$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\phi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$$

Donc

$$\dot{W}_t + \dot{\phi}_R + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0$$

$$\dot{W}_t - \dot{\phi}_R + \dot{m}h_1 - \dot{m}h_2 = 0$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{\phi}_R$$

On a : $\dot{\phi}_R = \dot{m}T_1(S_2 - S_1)$

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{m}T_1(S_2 - S_1)$$

$$-\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ Le travail théorique de compresseur

$$\boxed{W_t = rT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}}$$

Avec :

r : la chaleur fournie $r = 0.297 \text{ kg/kg.K}$

T : température en kelvin (K)

P_1, P_2 : La pression d'entre et la pression de sorte en (bar)

b. Echangeur de chaleur

On appliquant le premier principe de la thermodynamique sur l'échangeur de chaleur :

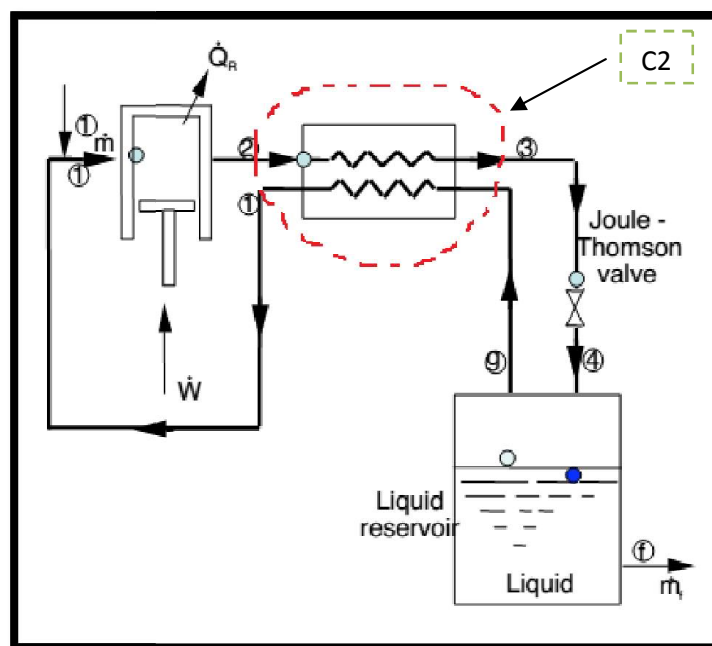


Figure III.4 : volume de contrôle C2

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\phi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$$

$\dot{\phi} = 0$ Adiabatique

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

$\dot{W}_t = 0$ Paroi indéformable

Donc

$$\sum_i \dot{m}_i (h_T) - \sum_j \dot{m}_j (h_T) = 0$$

$$\dot{m} h_2 + (\dot{m} - \dot{m}_f) h_g = \dot{m} h_3 + (\dot{m} - \dot{m}_f) h_1$$

$$(\dot{m} - \dot{m}_f) h_g - (\dot{m} - \dot{m}_f) h_1 = \dot{m} h_3 - \dot{m} h_2$$

$$(\dot{m} - \dot{m}_f) (h_g - h_1) = \dot{m} (h_3 - h_2) = \phi, \text{ flux échangé}$$

c. vanne de détente

On appliquant le premier principe de la thermodynamique sur la vanne de la détente :

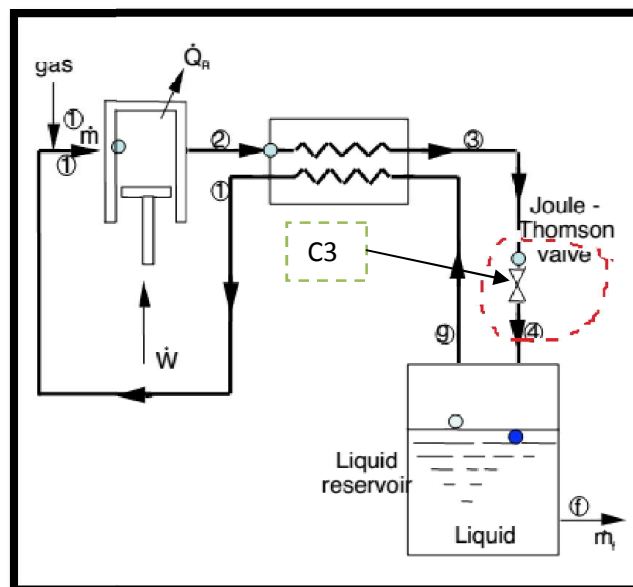


Figure III.5 : volume de contrôle C3

$$\dot{E} = \dot{S}$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4$$

On a : $m_3 = m_4 = \dot{m}$

Donc $h_3 = h_4$ détente isenthalpique

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

d. quantité de liquide extraite

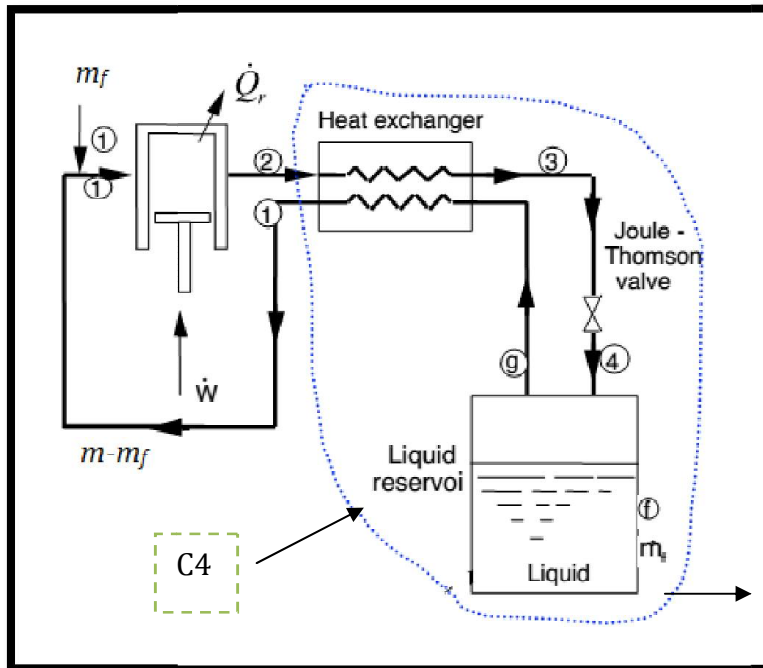


Figure III.6 : volume de contrôle C4

Les quantités entrant et sortant de ce volume de contrôle sont indiquées ci-dessous

$$\dot{E} = \dot{S}$$

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}_f h_f + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1$$

$$\dot{m}h_2 - \dot{m}h_1 = \dot{m}_f h_f - \dot{m}_f h_1$$

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}_f (h_f - h_1)$$

Réorganiser les termes, nous avons :

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)}$$

La fraction de gaz liquéfié est définie comme :

$$x = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

III.2.2. Cycle de CLAUDE

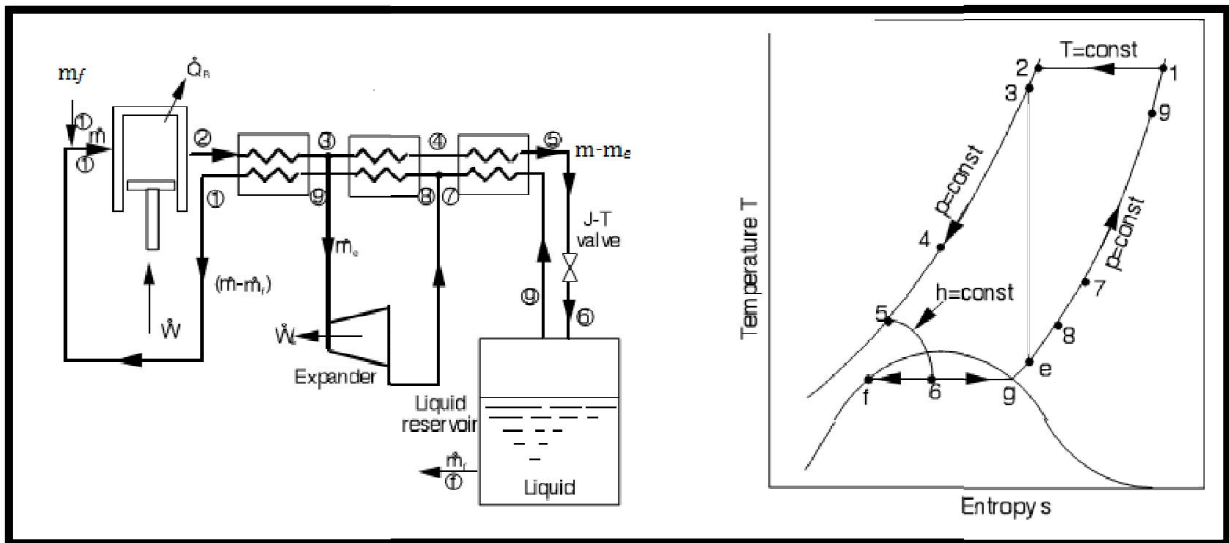


Figure III.7 : schéma de cycle de CLAUDE et le diagramme T-S

III.2.2.1 Expression de la quantité du liquide extraite x (m_f)

On a le volume de contrôle C5 :

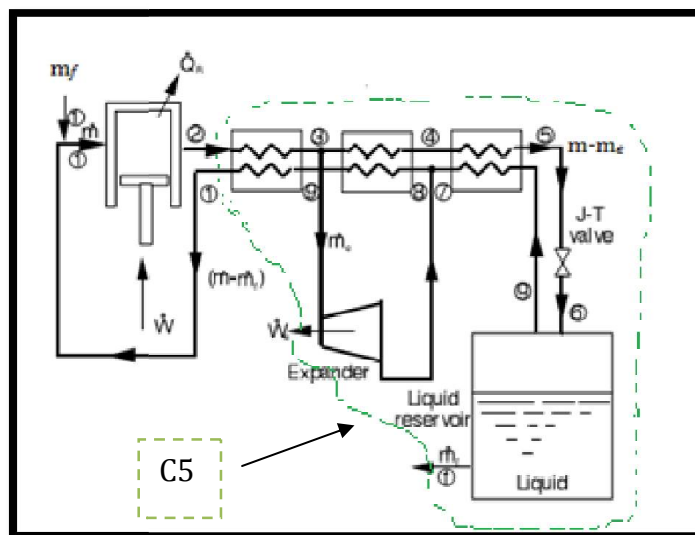


Figure III.8 : volume de contrôle C5

On applique la première loi de la thermodynamique sur le volume de contrôle C5 :

$$\dot{E} = \dot{S}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = \dot{\phi} + \dot{W}_t + \sum_i \dot{m}_i (h_T) + \sum_j \dot{m}_j (h_T)$$

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{E}_t = 0$$

$$\dot{\phi} = 0 \text{ Adiabatique}$$

Donc

$$\dot{m}h_2 = \dot{W}_t + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_f h_f$$

On a

$$\dot{W}_t = \dot{m}_e h_3 - \dot{m}_e h_e$$

À partir des deux équations ci-dessus, en substituant l'une à l'autre, nous avons :

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}_e h_3 - \dot{m}_e h_e + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_f h_f$$

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}_f (h_f - h_1) + \dot{m}_e (h_3 - h_e)$$

$$\dot{m}_f (h_1 - h_f) = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{m}_e (h_3 - h_e)$$

On divise sur \dot{m} et $(h_1 - h_f)$

On trouve :

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)} + \frac{\dot{m}_e (h_3 - h_e)}{\dot{m} (h_1 - h_f)}$$

Avec :

$$y = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$$

$$x = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}$$

y : le rapport de débit massique de la turbine

x : La fraction de gaz liquéfié ou liquide

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

D'où

$$x = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)} + y \frac{(h_3 - h_e)}{(h_1 - h_f)}$$

- Le 1er terme correspond au rendement d'un système simple de Linde Hampson
- Le 2ème terme est la variation du rendement due au moteur d'expansion dans le cycle

III.2.2.2. Le travail net du cycle de Claude

Il est clair que l'interaction de travail du système avec l'environnement est due à

- Compresseur (vers l'intérieur)
- turbine (vers l'extérieur)

L'exigence de travail net, si le travail de la turbine est utilisé dans le processus de compression, est donnée par

$$-W_{net} = -W_k - W_t$$

Pour le compresseur :

$$-\dot{W}_k = \dot{m}(T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2))$$

Pour la turbine :

$$W_t = \dot{m}_e(h_3 - h_e)$$

D'où

$$-W_{net} = \dot{m}(T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)) - \dot{m}_e(h_3 - h_e)$$

On divise sur / \dot{m}

$$-\frac{W_{net}}{\dot{m}} = (T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)) - y(h_3 - h_e)$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

II.3. Problématique

Une installation cryogénique à étranglement simple (cycle de Linde) utilise de l'azote comme gaz de travail

Les conditions de fonctionnement sont les suivants :

- $P_1 = 1 \text{ atm}$
- $T_0 = 300 \text{ K}$; $T_X = 77 \text{ K}$
- $r = 0.297 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{°K}}$
- $C_p = 1.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{°K}}$
- La due a l'imperfection de récupération thermique de l'échangeur E est de l'ordre de 5 °K
- L'apport de chaleur du milieu ambiant $3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$
- le rendement du compresseur $\eta = 0.65 \%$
- le débit massique du gaz du travail $\dot{m} = 3600 \text{ Kg} \cdot \text{h}^{-1}$

Les valeurs sont indiquées par des indices (voir l'annexe 1)

Le requis

1. détermination du travail du compresseur W_K
2. détermination l'ensemble des paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle
3. calcul de l'ensemble des caractéristiques thermodynamiques du cycle : quantité de liquide extraite, l'efficacité du cycle et le rendement thermodynamique (x, ε, η_T)

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

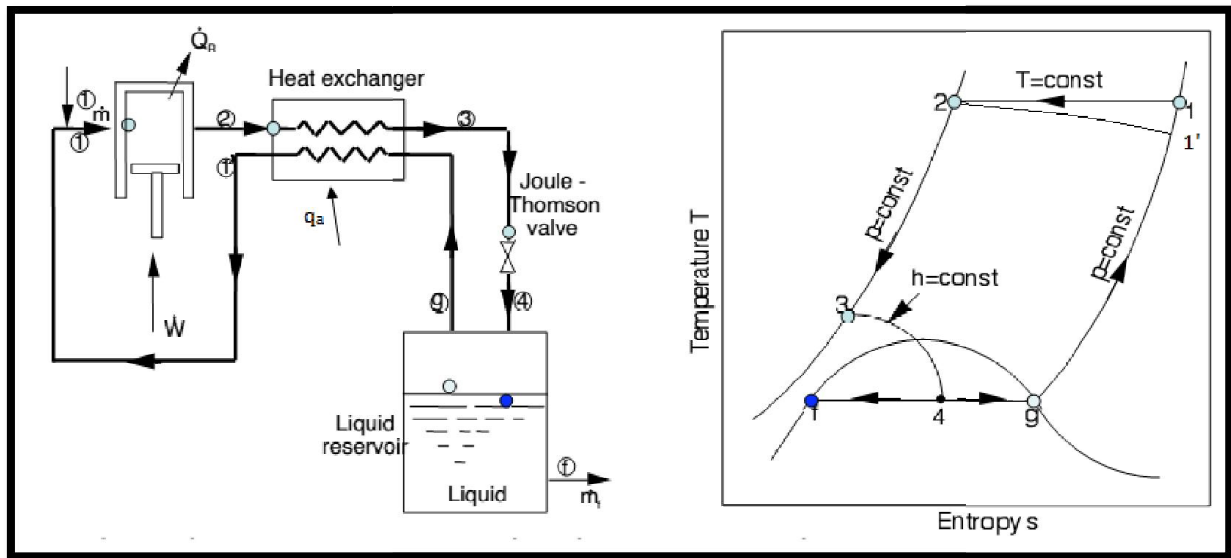


Figure III.9 : schéma du cycle de Linde avec les pertes de l'imperfection et le rapport de chaleur de milieu ambiant

II.3.1. Influence de taux de compression sur les paramètres du cycle de Linde

II.3.1.1. Pour taux de compression $Pr=200$

❖ Le travail du compresseur W_K

Travail théorique

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 300 (4.4 - 2.7) - (463 - 433)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 480 \text{ KJ/Kg}$$

Travail réel du compresseur :

$$W_{K_{réel}} = \frac{-\dot{W}_K}{\eta_K} = \frac{480}{0.65} = 738.46 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ Les paramètres du cycle (P, T, H, S) :

points	P (bar)	T(K)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	463	4.4
2	200	300	433	2.7
3	200	168	219.68	1.85
4	1	77	219.68	2.8
5	1	77	230	3
1'	1	295	456	4.35
f	1	77	32	0.5

Tableau III.1 Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $P_r=200$

$$\Delta T = T_1 - T_1'$$

$$T_1' = T_1 - \Delta T = 300 - 5 = 295$$

❖ Rechercher de la valeur H_3 :

On a la relation suivant :

$$H_3 = H_5 - \Delta H_T + \sum q + \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}} (H_1 - H_5 - q_{in})$$

AN :

$$H_3 = 230 - 30 + 7.3 + \frac{30 - 7.3}{463 - 32 - 4.8} (463 - 230 - 4.8)$$

$$H_3 = 219.68 \frac{KJ}{Kg}$$

❖ La quantité d'azote liquide extraite :

On a la relation suivant :

$$x = \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

AN :

$$x = \frac{30 - 7.8}{463 - 32 - 4.8}$$

$$x = 0.052 \frac{Kg_l}{Kg_{gaz}}$$

❖ le coefficient frigorifique

$$\varepsilon_L = \frac{x(H_1 - H_f - q_{in})}{W_K}$$

AN :

$$\varepsilon_L = \frac{0.052(462 - 32 - 4.8)}{738.46}$$

$$\varepsilon_L = 0.0299$$

❖ le rendement thermodynamique

$$\eta_T^L = \varepsilon_L \frac{T_0(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f}$$

AN :

$$\eta_T^L = 0.0299 \frac{300(4.4 - 0.5) - (463 - 32)}{463 - 32}$$

$$\eta_T^L = 0.0513 = 5.13\%$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

II.3.1.2. Pour taux de compression $Pr=150$

❖ Les paramètres du cycle (P, T, H, S) :

points	P (bar)	T(K)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	463	4.4
2	150	300	437	2.9
3	150	163	221.312	1.92
4	1	77	221.312	2.91
5	1	77	230	3
1'	1	295	456	4.35
f	1	77	32	0.5

Tableau III.2 Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $Pr=150$

❖ Le travail du compresseur W_K

Travail théorique

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 300 (4.4 - 2.9) - (463 - 437)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 451 \text{ KJ/Kg}$$

Travail réel du compresseur :

$$W_{K_{réel}} = \frac{-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}}}{\eta_K} = \frac{451}{0.65} = 693.846 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

❖ Rechercher de la valeur H_3 :

On a la relation suivant :

$$H_3 = H_5 - \Delta H_T + \sum q + \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}} (H_1 - H_5 - q_{in})$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

AN :

$$H_3 = 230 - 26 + 7.3 + \frac{26 - 7.3}{463 - 32 - 4.8} (463 - 230 - 4.8)$$

$$H_3 = 221.312 \frac{KJ}{Kg}$$

❖ **La quantité d'azote liquide extraite :**

On a la relation suivant :

$$x = \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

AN :

$$x = \frac{26 - 7.8}{463 - 32 - 4.8}$$

$$x = 0.0427 \frac{Kg_l}{Kg_{gaz}}$$

❖ **le coefficient frigorifique**

$$\varepsilon_L = \frac{x(H_1 - H_f - q_{in})}{W_K}$$

AN :

$$\varepsilon_L = \frac{0.0427(462 - 32 - 4.8)}{693.846}$$

$$\varepsilon_L = 0.0261$$

❖ **le rendement thermodynamique**

$$\eta_T^L = \varepsilon_L \frac{T_0(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f}$$

AN :

$$\eta_T^L = 0.0261 \frac{300(4.4 - 0.5) - (463 - 32)}{463 - 32}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

$$\eta_T^L = 0.0447 = 4.47 \%$$

II.3.1.3. Pour taux de compression Pr=100

❖ Les paramètres du cycle (P, T, H, S) :

points	P (bar)	T(K)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	300	463	4.4
2	100	300	442	3.1
3	100	158	226.31	2.08
4	1	77	226.31	2.96
5	1	77	230	3
1'	1	295	456	4.35
f	1	77	32	0.5

Tableau III.3 Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour Pr=100

❖ Le travail du compresseur W_K

Travail théorique

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

AN :

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 300 (4.4 - 3.1) - (463 - 442)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 369 \text{ KJ/Kg}$$

Travail réel du compresseur :

$$W_{K_{réel}} = \frac{-\dot{W}_K}{\eta_K} = \frac{370}{0.65} = 567.690 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ Rechercher de la valeur H_3 :

On a la relation suivant :

$$H_3 = H_5 - \Delta H_T + \sum q + \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}} (H_1 - H_5 - q_{in})$$

AN :

$$H_3 = 230 - 21 + 7.3 + \frac{26 - 7.3}{463 - 32 - 4.8} (463 - 230 - 4.8)$$

$$H_3 = 226.31 \frac{KJ}{Kg}$$

❖ La quantité d'azote liquide extraite :

On a la relation suivant :

$$x = \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

AN :

$$x = \frac{21 - 7.8}{463 - 32 - 4.8}$$

$$x = 0.0321 \frac{Kg_l}{Kg_{gaz}}$$

❖ le coefficient frigorifique

$$\varepsilon_L = \frac{x(H_1 - H_f - q_{in})}{W_K}$$

AN :

$$\varepsilon_L = \frac{0.0321(462 - 32 - 4.8)}{567.690}$$

$$\varepsilon_L = 0.0241$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ le rendement thermodynamique

$$\eta_T^L = \varepsilon_L \frac{T_0(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f}$$

AN :

$$\eta_T^L = 0.0241 \frac{300(4.4 - 0.5) - (463 - 32)}{463 - 32}$$

$$\eta_T^L = 0.0413 = 4.13 \%$$

III.3.1.4. Discussion du résultat

Exemple	P (bar)	x
1	200	0.052
2	150	0.047
3	100	0.0321

Tableau III.4 Influence de taux de compression sur les paramètres du cycle de Linde

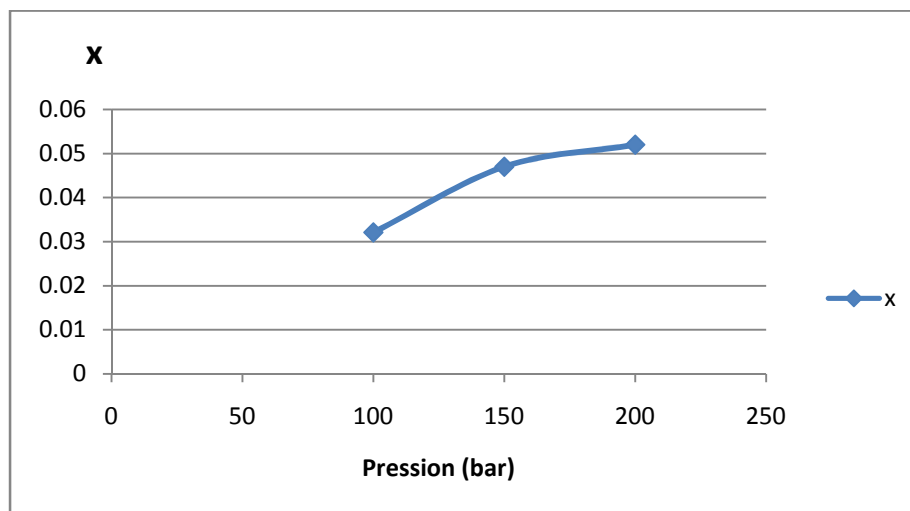


Figure III.10 : diagramme de quantité du liquide extraite en fonction de taux de compression

Observation : Lorsque la pression de compression augmente, le rendement en liquide augmente à une température de compression donnée T_1

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

II.3.2. Influence de température d'entre de compresseur sur les paramètres du cycle de Linde

II.4.2.1. pour $T_1=290 \text{ }^0\text{K}$

❖ Les paramètres du cycle (P, T, H, S) :

points	P (bar)	T(K)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	290	452	4.32
2	200	290	418	2.7
3	200	163	217.26	1.7
4	1	77	217.26	2.67
5	1	77	230	3
1'	1	283	447.2	4.28
f	1	77	32	0.5

Tableau III.5 Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $T_1=290 \text{ }^0\text{K}$

❖ Le travail du compresseur W_K

Travail théorique

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 290 (4.32 - 2.7) - (452 - 418)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 435.8 \text{ KJ/Kg}$$

Travail réel du compresseur :

$$W_{K_{réel}} = \frac{-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}}}{\eta_K} = \frac{435.8}{0.65} = 670.46 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ Rechercher de la valeur H_3 :

On a la relation suivant :

$$H_3 = H_5 - \Delta H_T + \sum q + \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}} (H_1 - H_5 - q_{in})$$

AN :

$$H_3 = 230 - 34 + 7.3 + \frac{34 - 7.3}{452 - 32 - 4.8} (452 - 230 - 4.8)$$

$$H_3 = 217.26 \frac{KJ}{Kg}$$

❖ La quantité d'azote liquide extraite :

On a la relation suivant :

$$x = \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

AN :

$$x = \frac{34 - 7.8}{452 - 32 - 4.8}$$

$$x = 0.0631 \frac{Kg_l}{Kg_{gaz}}$$

❖ le coefficient frigorifique

$$\varepsilon_L = \frac{x(H_1 - H_f - q_{in})}{W_K}$$

AN :

$$\varepsilon_L = \frac{0.0631(452 - 32 - 4.8)}{670.46}$$

$$\varepsilon_L = 0.039$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ le rendement thermodynamique

$$\eta_T^L = \varepsilon_L \frac{T_0(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f}$$

AN :

$$\eta_T^L = 0.039 \frac{290(4.32 - 0.5) - (452 - 32)}{452 - 32}$$

$$\eta_T^L = 0.0638 = 6.38 \%$$

II.3.2.2. pour $T_1=280 \text{ } ^\circ\text{K}$

❖ Les paramètres du cycle (P, T, H, S) :

points	P (bar)	T(K)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	280	440	4.29
2	200	280	405	2.68
3	200	155	215.99	1.55
4	1	77	215.99	2.47
5	1	77	230	3
1'	1	275	235.2	4.25
f	1	77	32	0.5

Tableau III.6 Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $T_1=280 \text{ } ^\circ\text{K}$

❖ Le travail du compresseur W_K

Travail théorique

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

AN :

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 280 (4.29 - 2.68) - (440 - 405)$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 415.8 \text{ KJ/Kg}$$

Travail réel du compresseur :

$$W_{K_{réel}} = \frac{-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}}}{\eta_K} = \frac{435.8}{0.65} = 639.69 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

❖ Rechercher de la valeur H_3 :

On a la relation suivant :

$$H_3 = H_5 - \Delta H_T + \sum q + \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}} (H_1 - H_5 - q_{in})$$

AN :

$$H_3 = 230 - 35 + 7.3 + \frac{34 - 7.3}{440 - 35 - 4.8} (440 - 230 - 4.8)$$

$$H_3 = 215.99 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

❖ La quantité d'azote liquide extraite :

On a la relation suivant :

$$x = \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

AN :

$$x = \frac{35 - 7.8}{440 - 32 - 4.8}$$

$$x = 0.0674 \frac{\text{Kg}_l}{\text{Kg}_{gaz}}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ le coefficient frigorifique

$$\varepsilon_L = \frac{x(H_1 - H_f - q_{in})}{W_K}$$

AN :

$$\varepsilon_L = \frac{0.0674(440 - 32 - 4.8)}{639.69}$$

$$\varepsilon_L = 0.0424$$

❖ le rendement thermodynamique

$$\eta_T^L = \varepsilon_L \frac{T_0(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f}$$

AN :

$$\eta_T^L = 0.0424 \frac{280(4.29 - 0.5) - (440 - 32)}{440 - 32}$$

$$\eta_T^L = 0.0678 = 6.78 \%$$

II.3.2.3. pour $T_1=273 \text{ } ^\circ\text{K}$

❖ Les paramètres du cycle (P, T, H, S) :

points	P (bar)	T(K)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg.K)
1	1	273	434	4.25
2	200	273	394	2.5
3	200	151	212.30	1.52
4	1	77	212.30	2.43
5	1	77	230	3
1'	1	268	429.2	2.19
f	1	77	32	0.5

Tableau III.7 Les paramètres (P, T, H et S) aux chaque points figuratifs du cycle pour $T_1=273 \text{ } ^\circ\text{K}$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

❖ Le travail du compresseur W_K

Travail théorique

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 273 (4.25 - 2.5) - (434 - 394)$$

$$-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = 437.45 \text{ KJ/Kg}$$

Travail réel du compresseur :

$$W_{K_{réel}} = \frac{-\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}}}{\eta_K} = \frac{437.45}{0.65} = 673 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

❖ Rechercher de la valeur H_3 :

On a la relation suivant :

$$H_3 = H_5 - \Delta H_T + \sum q + \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}} (H_1 - H_5 - q_{in})$$

AN :

$$H_3 = 230 - 40 + 7.3 + \frac{37 - 7.3}{434 - 35 - 4.8} (434 - 230 - 4.8)$$

$$H_3 = 212.30 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

❖ La quantité d'azote liquide extraite :

On a la relation suivant :

$$x = \frac{\Delta H_T - \sum q}{H_1 - H_f - q_{in}}$$

AN :

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

$$x = \frac{40 - 7.8}{434 - 32 - 4.8}$$

$$x = 0.0810 \frac{Kg_l}{Kg_{gaz}}$$

❖ le coefficient frigorifique

$$\varepsilon_L = \frac{x(H_1 - H_f - q_{in})}{W_K}$$

AN :

$$\varepsilon_L = \frac{0.0810(434 - 32 - 4.8)}{673}$$

$$\varepsilon_L = 0.0478$$

❖ le rendement thermodynamique

$$\eta_T^L = \varepsilon_L \frac{T_0(S_1 - S_f) - (H_1 - H_f)}{H_1 - H_f}$$

AN :

$$\eta_T^L = 0.0478 \frac{273(4.25 - 0.5) - (434 - 32)}{434 - 32}$$

$$\eta_T^L = 0.0739 = 7.39 \%$$

III.3.2.4. Discussion du résultat

Exemple	T (K)	x
1	300	0.052
2	290	0.0631
3	280	0.0674
4	273	0.0810

Tableau III.8 Influence de température d'entre de compresseur sur les paramètres du cycle de Linde

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

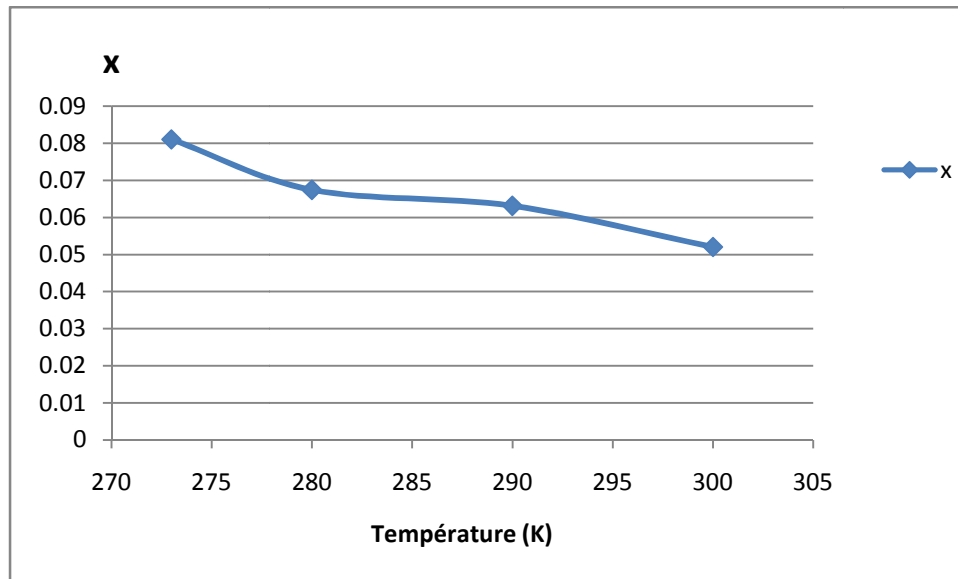


Figure III.11 diagramme de quantité du liquide extraite en fonction de température d'entrée

Observation : Lorsque la température de compression diminue, le rendement en liquide augmente à une pression de compression donnée.

II.3.3. Influence de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur les paramètres du cycle de Linde

Un échangeur de chaleur est un dispositif dans lequel l'effet de refroidissement du fluide froid est transféré pour pré-refroidir le fluide chaud, Il peut s'agir d'un type à deux fluides ou à trois fluides en fonction du nombre d'entrées et de sorties fixées à l'échangeur de chaleur

Le processus d'échange de chaleur se produit à une pression constante, par conséquent, c'est un processus isobare.

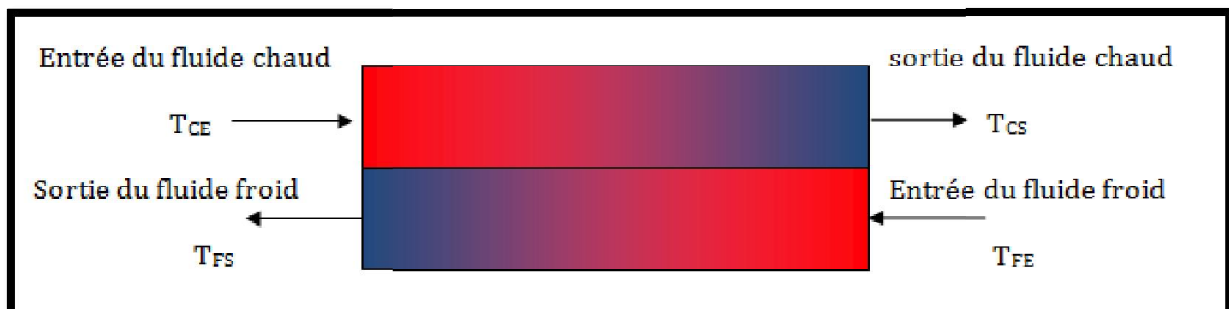


Figure III.12 : schéma simplifié d'échangeur contre courant

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

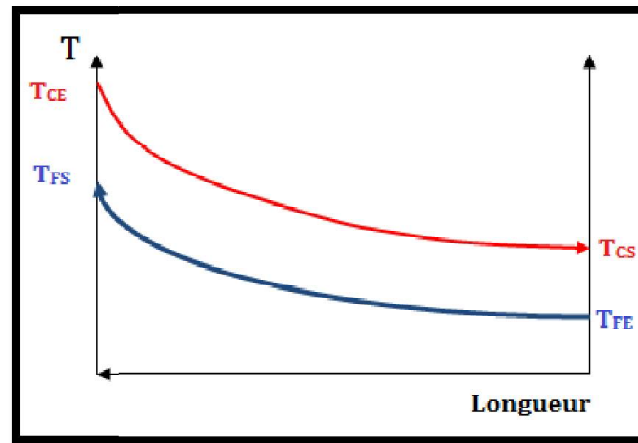


Figure III.13 : diagramme de distribution de température

III.3.3.1 Efficacité d'un échangeur

L'efficacité d'un échangeur est le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit,..) dans l'échangeur.

$$\varepsilon = \frac{Q_{min}}{Q_{max}} = \frac{\Delta T_C}{\Delta T_E}$$

Avec : $\Delta T_C = T_{CE} - T_{CS}$

$\Delta T_E = T_{CE} - T_{FE}$

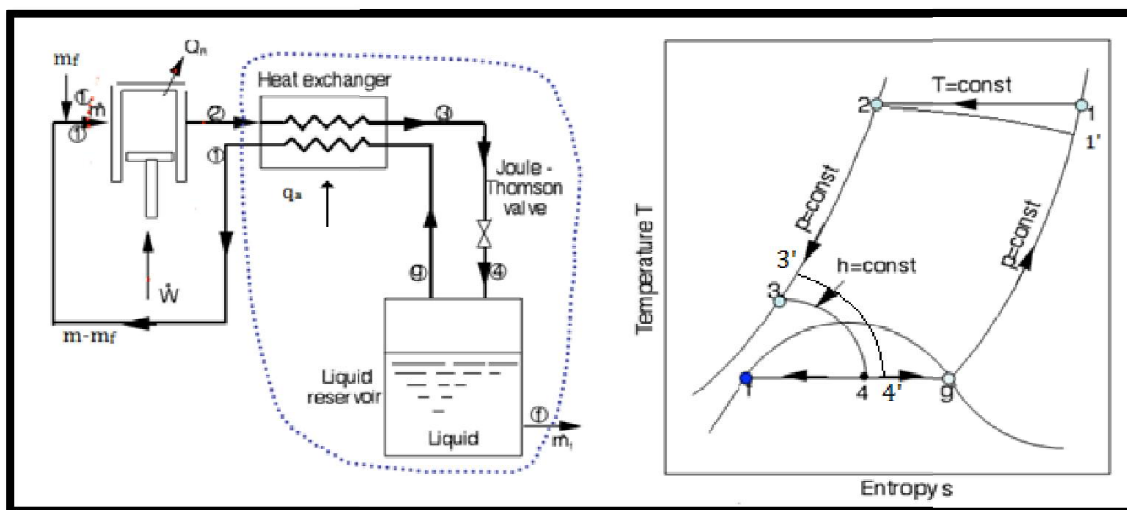


Figure III.14 : schéma de cycle de Linde et le diagramme T-S avec les pertes d'imperfection

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

On applique le 1^{er} loi de la thermodynamique sur le volume de contrôle :

On considère que $\dot{m} = 1$; $\dot{m}_f = x$

$$\dot{E} = \dot{S}$$

$$h_2 + q_a = xh_f + (1 - x)h'_1$$

D'où

$$x = \frac{h'_1 - h_2 - q_a}{h'_1 - h_f}$$

On a l'efficacité de l'échangeur :

$$\varepsilon = \frac{h'_1 - h_g}{h_1 - h_g}$$

$$h'_1 = \varepsilon(h_1 - h_g) + h_g$$

À partir des deux équations ci-dessus, en substituant l'une à l'autre, nous avons :

$$x = \frac{h_g - h_2 + \varepsilon(h_1 - h_g) - q_a}{h_g - h_f + \varepsilon(h_1 - h_g)}$$

$$x = \frac{h_g - h_2 + \varepsilon(h_1 - h_g) - q_a + (h_1 - h_g) - (h_1 - h_g)}{h_g - h_f + \varepsilon(h_1 - h_g) + (h_1 - h_g) - (h_1 - h_g)}$$

Donc

$$x = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g) - q_a}{(h_1 - h_f) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}$$

On utilise les données du premier exemple :

	1	2	<i>f</i>	5 (g)
P (bar)	1	200	1	1
T (K)	300	300	77	77
H (KJ/Kg)	463	433	32	230
S (KJ/Kg.K)	4.4	2.7	0.5	3

Tableau III.9 : paramètres du cycle de Linde

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

III.3.3.2 Pour $\varepsilon = 100\%$

On a

$$x = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g) - q_a}{(h_1 - h_f) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}$$

AN :

$$x = \frac{(463 - 433) - (1 - 1)(463 - 230) - 3}{(463 - 32) - (1 - 1)(463 - 230)}$$

$$x = 0.0626$$

III.4.3.3 Pour $\varepsilon = 95\%$

On a

$$x = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g) - q_a}{(h_1 - h_f) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}$$

AN :

$$x = \frac{(463 - 433) - (1 - 0.95)(463 - 230) - 3}{(463 - 32) - (1 - 0.95)(463 - 230)}$$

$$x = 0.0366$$

III.3.3.4 Pour $\varepsilon = 90\%$

On a

$$x = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g) - q_a}{(h_1 - h_f) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}$$

AN :

$$x = \frac{(463 - 433) - (1 - 0.90)(463 - 230) - 3}{(463 - 32) - (1 - 0.90)(463 - 230)}$$

$$x = 0.0090$$

III.3.3.5 Pour $\varepsilon = 85\%$

On a

$$x = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g) - q_a}{(h_1 - h_f) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}$$

Chapitre III Etude thermodynamique du cycle de liquéfaction de l'Azote

AN :

$$x = \frac{(463 - 433) - (1 - 0.85)(463 - 230) - 3}{(463 - 32) - (1 - 0.85)(463 - 230)}$$

$$x = -0.0200$$

III.3.3.6 Discussion du résultat

exemple	ε	x
1	100	0.0626
2	95	0.0366
3	90	0.0090
4	85	-0.0200

Tableau III.10 : les résultats d'influence de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur les paramètres du cycle de Linde

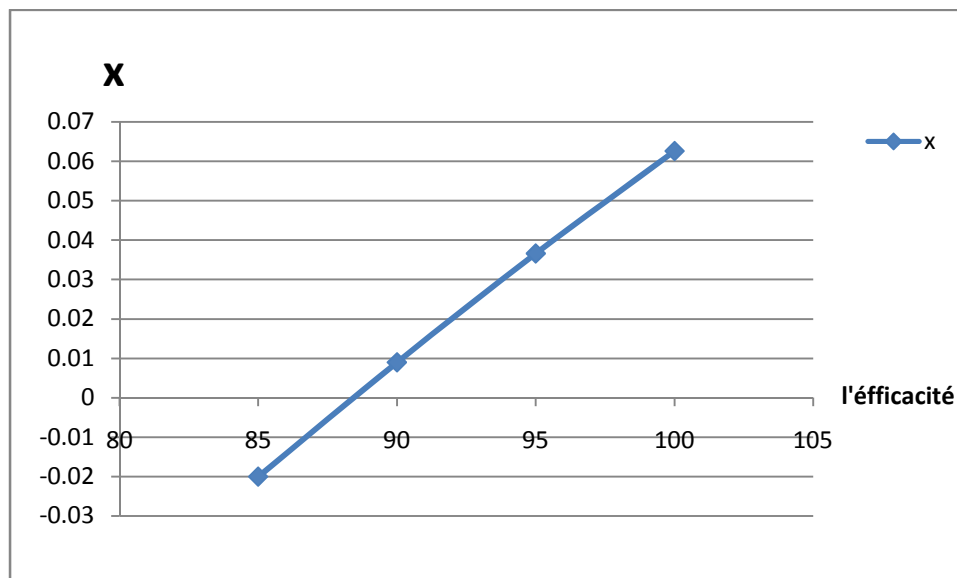


Figure III.15 : diagramme de quantité du liquide extraite en fonction de l'efficacité de l'échangeur de chaleur

Observation : l'efficacité devrait être supérieure à 88% pour d'obtenir un rendement en liquide, et lorsque l'efficacité diminue, le rendement diminue de façon significative

Chapitre IV

Simulation du cycle de LINDE

et du cycle de CLAUDE sur

(Aspen HYSYS) pour la

liquéfaction de l'azote N_2

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.1. Introduction

La simulation est un outil utilisé dans différents domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, permettant d'analyser le comportement d'un système avant de l'implémenter et d'optimiser son fonctionnement en testant différentes solutions et différentes conditions opératoires. Elle s'appuie sur l'élaboration d'un modèle du système, et permet de réaliser des scénarios et d'en déduire le comportement du système physique analysé.

L'avantage majeur de la simulation est la fourniture d'un bon aperçu du comportement du système réel. Cet aperçu peut être difficile de l'avoir à travers l'expérience et l'intuition seule, en particulier pour les systèmes complexes avec plusieurs variables interactives.[18]

IV.2. Présentation du logiciel Aspen HYSYS

HYSYS n'est pas le logiciel de simulation le plus flexible, ni le plus utilisé dans l'industrie, mais il a l'avantage d'être convivial et facile à utiliser une fois que les éléments de base sont compris. HYSYS a été développé pour l'industrie du pétrole, bien qu'il soit utilisé pour d'autres types de procédés chimiques. Les simulations sont accomplies en utilisant les outils des menus. En plus, il dispose d'une interface graphique pour la construction des diagrammes du procédé (*PDF – Process Flow Diagrams*). On présente ici les étapes nécessaires pour une simulation. [18]

IV.2.1. Définition du HYSYS

HYSYS est un logiciel de simulation des procédés de génie chimique développé par la société HYPROTECH (Canada). Il a été conçu pour permettre le traitement d'une vaste gamme de problèmes allant de la séparation bi, tri phasique simple jusqu'à la distillation et la transformation chimique.

Le Simulateur HYSYS est un ensemble de model mathématiques des opérations unitaire (ballon, colonne de distillation, compresseur, vanne...etc.), ces opérations sont connectées dans un schéma de procédé PFD par le courant d'information généré dans ces opérations.

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.2.2. L'utilisation du logiciel HYSYS

Le HYSYS peut être utilisé pour :

- Établissement des bilans matière et d'énergie d'un procédé industriel.
- Dimensionnement des équipements.
- Engineering.
- Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de composition de l'alimentation.
- Détermination des performances des équipements.

Les ingénieurs engagés dans l'engineering de design utilisent le logiciel HYSIS pour faire des calculs rapides en utilisant des modèles efficaces et des techniques optimales.

La simulation par HYSYS réduit les coûts de l'engineering par :

- ✓ Des calculs rapides de différents designs en utilisant des modèles efficaces et des techniques optimales pour s'assurer que les équipements du procédé sont correctement spécifiés afin de délivrer les caractéristiques du produit voulues aux rendements de la production désirés.
- ✓ Création de modèles qui peuvent être appliqués durant le fonctionnement de l'unité à partir du design de conception jusqu'aux détails : Estimation, formation et optimisation.

IV.2.3. Les étapes d'utilisation du logiciel HYSYS [18]

Pour réaliser une simulation en HYSYS, les pas suivants sont nécessaires :

1. Choix des composés
2. Sélection d'un modèle thermodynamique
3. Construction du PFD (*PDF – Process Flow Diagrams*).
4. Spécification des débits et des unités
5. Exécution du programme de simulation
6. Interprétation des résultats

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

- ❖ Ces étapes seront utilisées ci-dessous avec les exemples d'application pour le cycle de LINDE et le cycle de CLAUDE pour la liquéfaction de l'Azote.

1. Choix des composés

Il y a beaucoup de composés dans la bibliothèque et ils sont classés en groupes. Lorsqu'il est possible, les composés peuvent être trouvés en utilisant des filtres et ajoutés à la liste des composés du procédé à simuler.

Dans notre exemple on va choisir l'Azote N₂ comme gaz de travail

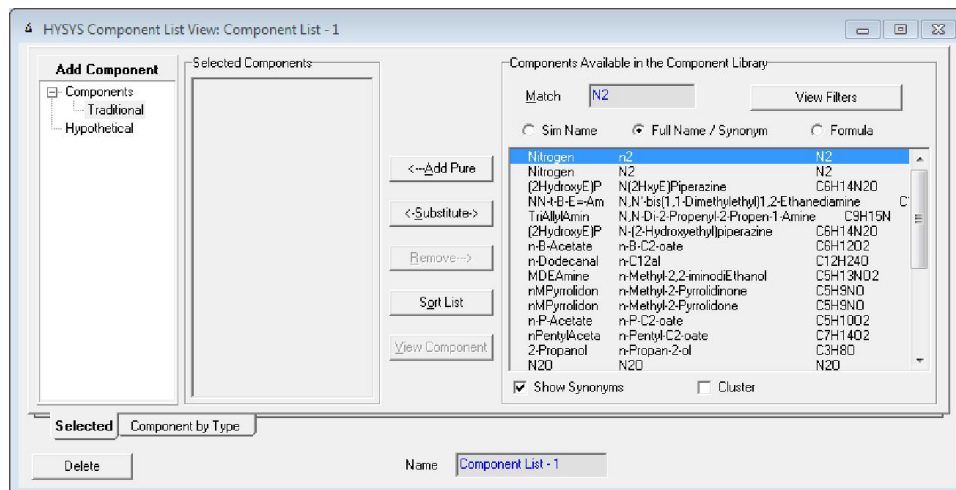


Figure IV.1 : fenêtre de sélectionner des composés

2. Sélection d'un modèle thermodynamique (*Fluid packages*)

L'utilisateur doit sélectionner le modèle thermodynamique à utiliser pour calculer les propriétés de mélange (masse volumique, enthalpie,...) ainsi que pour calculer l'équilibre de phases dans les courants et dans les unités de séparation.

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

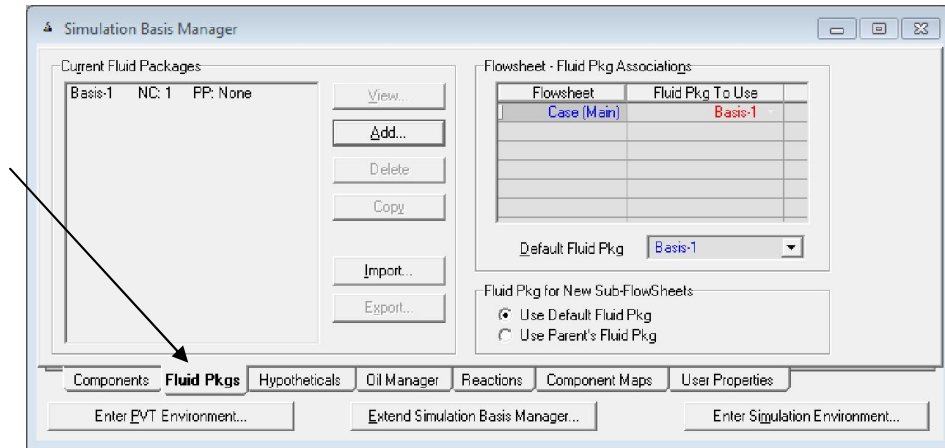


Figure IV.2 : fenêtre de choisir le modèle thermodynamique

Le modèle le plus simple suppose un comportement de gaz idéal pour la phase gaz et un comportement de solution idéal pour la phase liquide. Donc, on utilise la loi de Raoult pour les calculs de l'équilibre de phases. Dans HYSYS, ce modèle est appelé « Peng-Robinson »

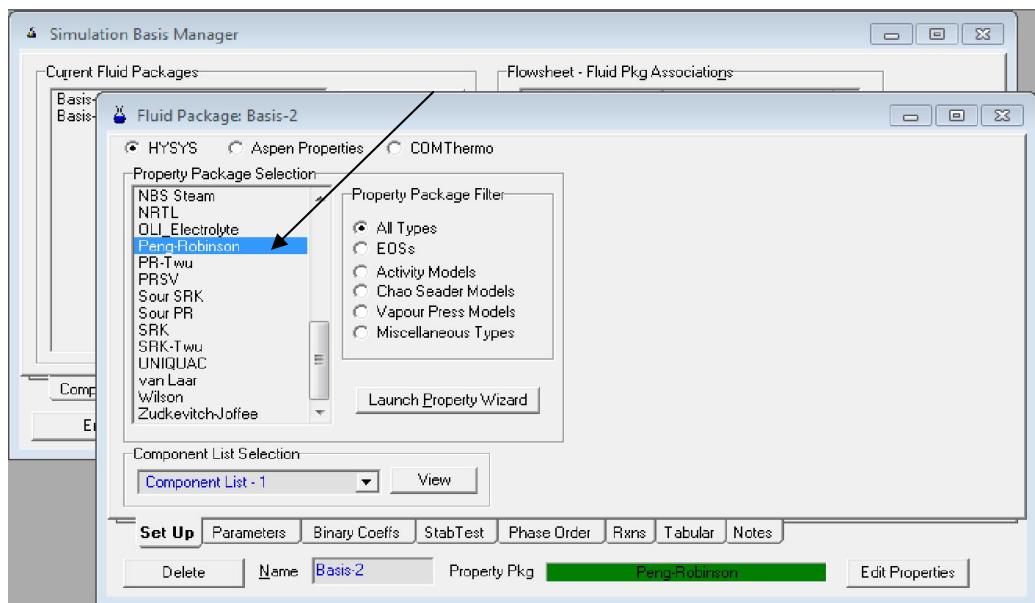


Figure IV.3 : le choix de modèle thermodynamique « Peng-Robinson »

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

3. Construction du PFD (*PDF – Process Flow Diagrams*).

La base d'une simulation est le développement du PFD. Ceci est fait en sélectionnant des unités dans la palette d'objets et en les déposants sur la feuille du procédé. De même, tout courant de matière et d'énergie doit être placé sur le PFD. Chaque courant d'entrée ou de sortie est connecté à une unité. Les courants et les unités sont nommés et ordonnés sur le PFD afin de faciliter la compréhension du diagramme du procédé

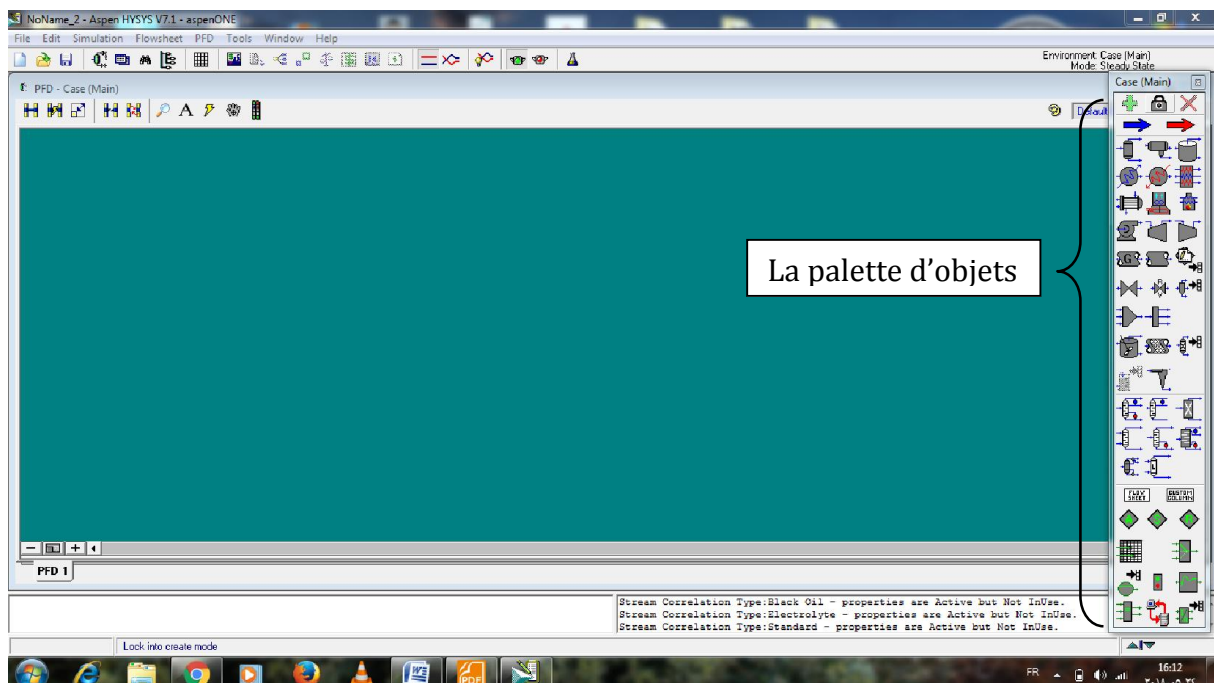


Figure IV.4 : la feuille du procédé

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.3. Exemple de simulation du cycle de LINDE pour la liquéfaction de l'Azote N₂

La figure ci-dessous montre le model de cycle de Linde pour la liquéfaction de l'Azote, Les conditions choisies pour le fonctionnement du procès sont données dans le Tableau V.1

On choisissant les équipements et outils nécessaires :

1. Mixeur
2. compresseur
3. système de pré-refroidissement.
4. échangeur
5. vanne de détente.
6. séparateur
7. Système de recyclage

Les données :

- Entrée de compresseur (K-100) :

Débit massique du l'azote N₂ $\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$

Pression $P = 100 \text{ KPa}$

- Sortie de compresseur (K-100) :

Débit massique du l'azote N₂ $\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$

Pression $P = 20000 \text{ KPa} = 200 \text{ Bar}$

- Entrée de l'échangeur (LNG-100) :

Température $T = 300 \text{ K}$

$$T = 26.85 \text{ C}$$

- Sortie de l'échangeur (LNG-100) :

Température $T = 168 \text{ K}$

$$T = -105.1 \text{ C}$$

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

- Sortie de la vanne de détente (VLV-100)

Pression $P = 100 \text{ KPa}$

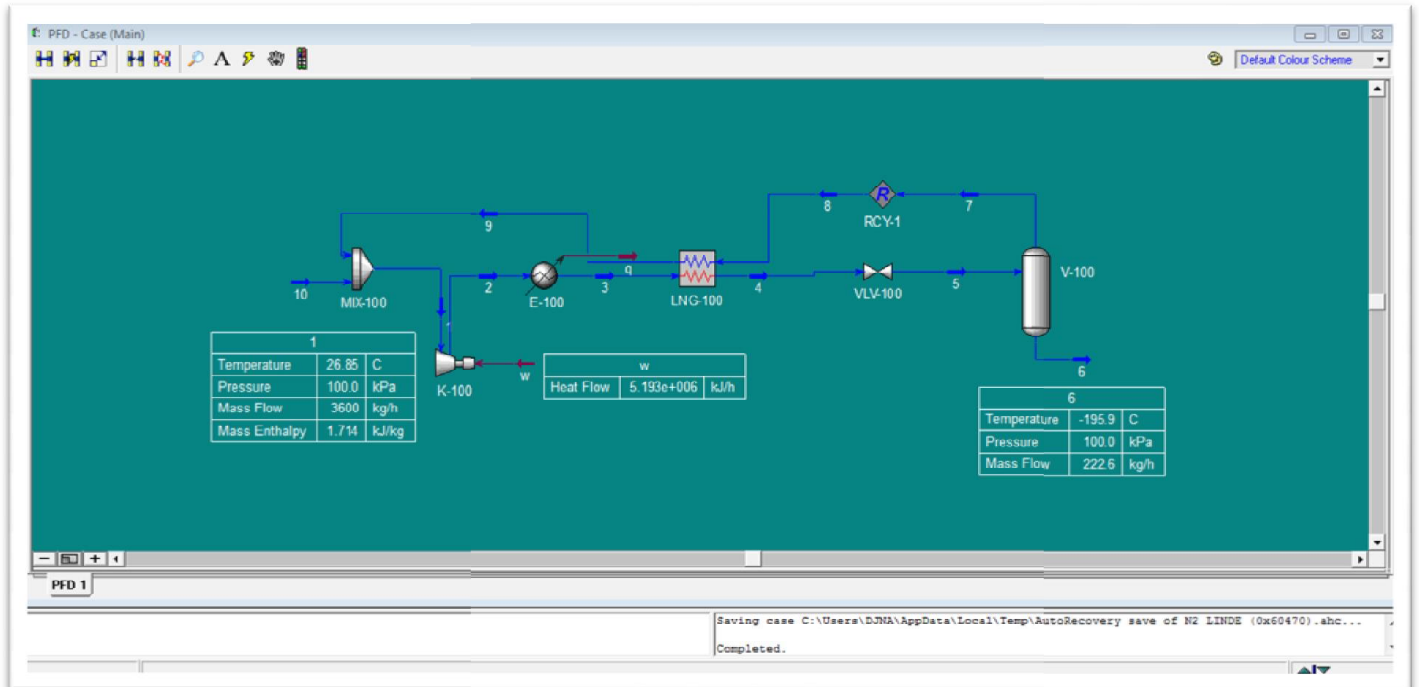


Figure IV.5 : PFD (Process Flow Diagram) de Cycle de Linde pour la liquéfaction de l'Azote

Le compresseur est modélisé isentropique avec un rendement isentropique de 85%. La pression de refoulement est de 200 bars et donc un rapport de pression de $200 / 1,0$ est considéré.

L'Azote sous pression qui sort du compresseur est trop chaud pour entrer dans le côté du tube de l'échangeur de chaleur (LNG-100) Il devrait être refroidi dans un pré-refroidisseur (E-100) jusqu'à 300 K et 200 bars est considéré. Il n'y a pas de perte de charge à l'intérieur

Le fluide refroidi est envoyé dans un échangeur de chaleur pour être refroidi d'avantage et alors il voit sa température chute jusqu'à $T = -105.1^{\circ}\text{C}$ à pression constante

En suite il est détendu dans la vanne de J-T jusqu'à la pression $P=100\text{KPa}$ à enthalpie constante la diminution de la pression est provoqué une baisse appréciable de la température jusqu'à $T=-195.9^{\circ}\text{C}$

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

le fluide est séparé en deux phases (X_{liq} , X_{vap}), pour l'acheminer dans un séparateur une fraction est liquéfiée et la partie restante retourne au rectifieur et en suite à un échangeur pour refroidir l'air chaud.

	Name	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
▶ 1		100	26.85	3600	1	48.0069
2		20000	1268.38	3600	0	40455.2
3		20000	26.85	3600	1	-828.849
4		20000	-105.15	3600	0	-6739.73
5		100	-195.889	3600	0.938175	-6739.73
6		100	-195.889	222.569	0	-11992
7		100	-195.889	3377.43	1	-6393.61
8		100	-195.889	3377.43	1	-6393.61
9		100	22.0104	3377.43	1	-93.2094
10		100	99.8016	222.569	1	2190.93

Tableau IV. 1: Résultat de simulation par HYSYS pour cycle de LINDE.

IV.3.1. Discussion des résultats

Du tableau ci-dessus la quantité d'air liquide produite est donnée par colonne (6)

- ❖ Le débit de l'Azote liquide est $\dot{m}_f = 222.569 \text{ kg/h}$
- ❖ la pression $P=100\text{KPa}$
- ❖ la température $T=-195.9 \text{ }^\circ\text{C}$
- ❖ fraction de vapeur : 0

Le taux de liquéfaction est donné ci-après :

$$x = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{222.569}{3600} = 0.0618 = 6.18 \%$$

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.3.2. Flux de chaleur au niveau de l'échangeur (LNG-100)

La courbe ci-dessous représente la variation de flux de chaleur au niveau de l'échangeur en fonction de la température.

La courbe montre deux courbes le corps froid qui est la fraction non liquéfié, et l'autre caractérise le corps chaud qui est (l'azote à liquéfier)

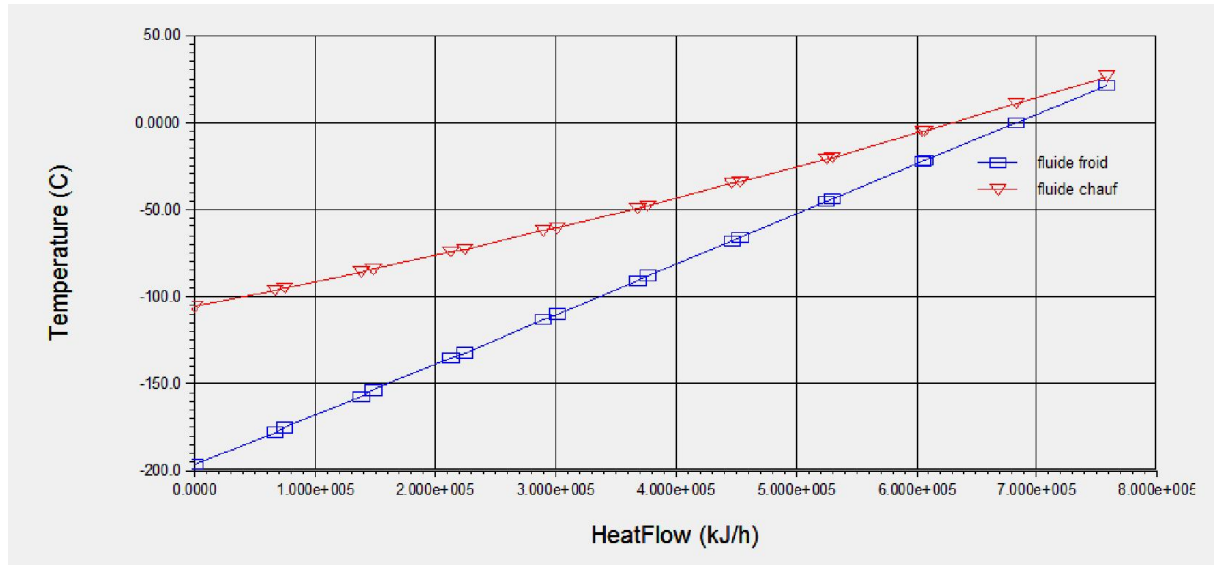


Figure IV. 6: Diagramme flux de chaleur en fonction de la température

V. 3.3. Diagramme DTLM (différence logarithmique moyen de température) en fonction de la température

La courbe suivante donne la variation de DTLM en fonction de la température, à l'entre et à la sortie de l'échangeur de chaleur.

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

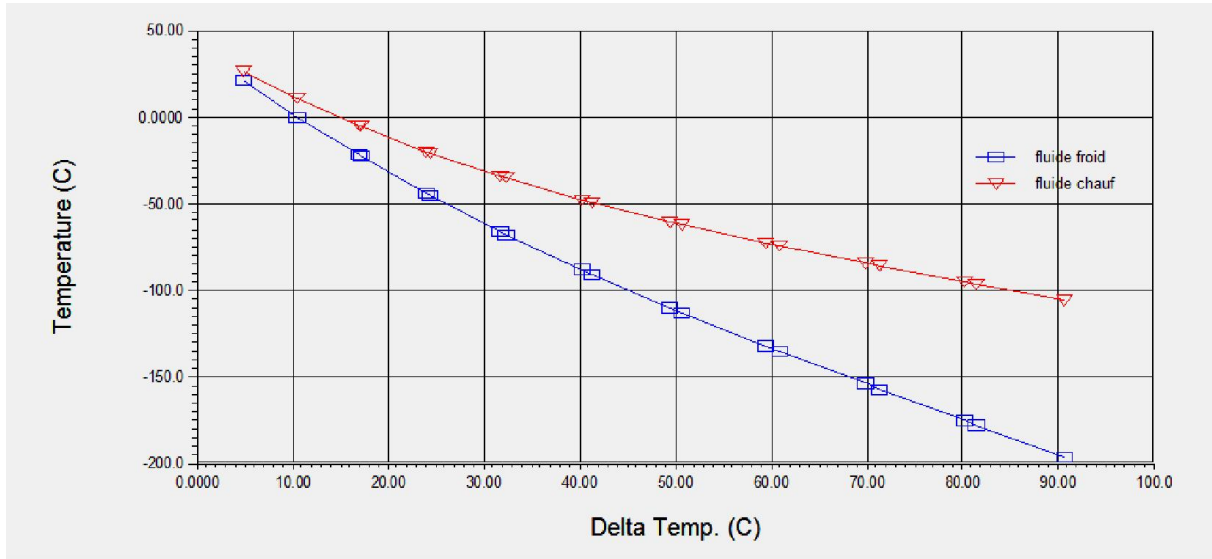


Figure IV. 7 : Diagramme DTLM (différence logarithmique moyen de température) en fonction de la température

IV.3.4. Diagramme le coefficient d'échange global en fonction de la température

La courbe suivante donne la variation de coefficient d'échange global en fonction de la température, à l'entre et à la sortie de l'échangeur de chaleur

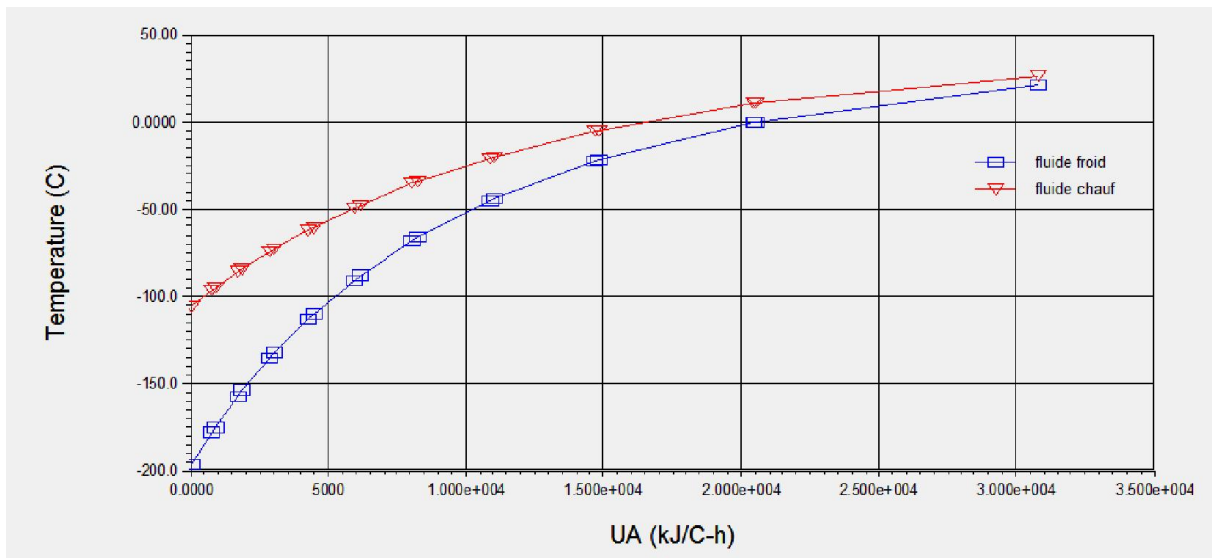


Figure IV.8 : Diagramme le coefficient d'échange global en fonction de la température

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.3.5. Diagramme Enthalpie en fonction de la température

La courbe suivante donne la variation de Enthalpie en fonction de la température, à l'entre et à la sortie de l'échangeur de chaleur.

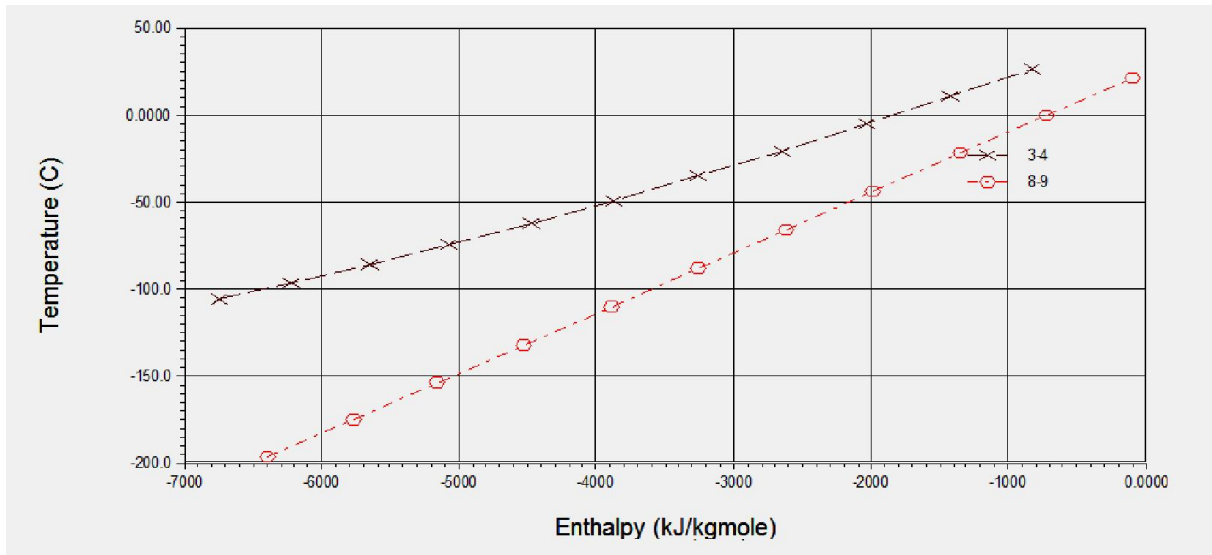


Figure IV.9 : Diagramme Enthalpie en fonction de la température.

IV.4. Exemple de simulation du cycle de CLAUDE pour la liquéfaction de l'Azote N₂

La description des différents composants et les conditions dans lesquelles ils opèrent sont décrites par la suite :

On choisissant les équipements et outils nécessaires :

1. Mixeur
2. Compresseur
3. Système de pré-refroidissement.
4. 3 échangeurs
5. Vanne de détente.
6. Turbine
7. Séparateur
8. Système de recyclage
9. Diviseur

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

Les données :

- Entrée de compresseur :

Débit massique du l'azote N₂ $\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$

Pression $P = 100 \text{ KPa}$

- Sortie de compresseur:

Débit massique du l'azote N₂ $\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$

Pression $P = 20000 \text{ KPa} = 200 \text{ Bar}$

- Entrée de l'échangeur(1) :

Température $T = 300 \text{ K}$

$$T = 26.85 \text{ C}$$

- Sortie de l'échangeur (1) :

Température $T = -12 \text{ C}$

- Sortie de l'échangeur (2) :

Température $T = -70 \text{ C}$

- Sortie de l'échangeur (3) :

Température $T = -105.1 \text{ C}$

- Entrée de diviseur

Pression $P = 20000 \text{ KPa} = 200 \text{ Bar}$

Débit massique du l'azote N₂ $\dot{m} = 3600 \text{ kg/h}$

- Sortie de diviseur

Pression $P = 20000 \text{ KPa} = 200 \text{ Bar}$

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

Première division 90 % de débit massique du l'azote N₂ vers l'échangeur (2) $\dot{m} = 3240 \text{ kg/h}$

Deuxième division 10 % de débit massique du l'azote N₂ vers la turbine $\dot{m} = 360 \text{ kg/h}$

➤ Sortie de la turbine

Pression $P = 100 \text{ KPa}$

➤ Sortie de la vanne de détente

Pression $P = 100 \text{ KPa}$

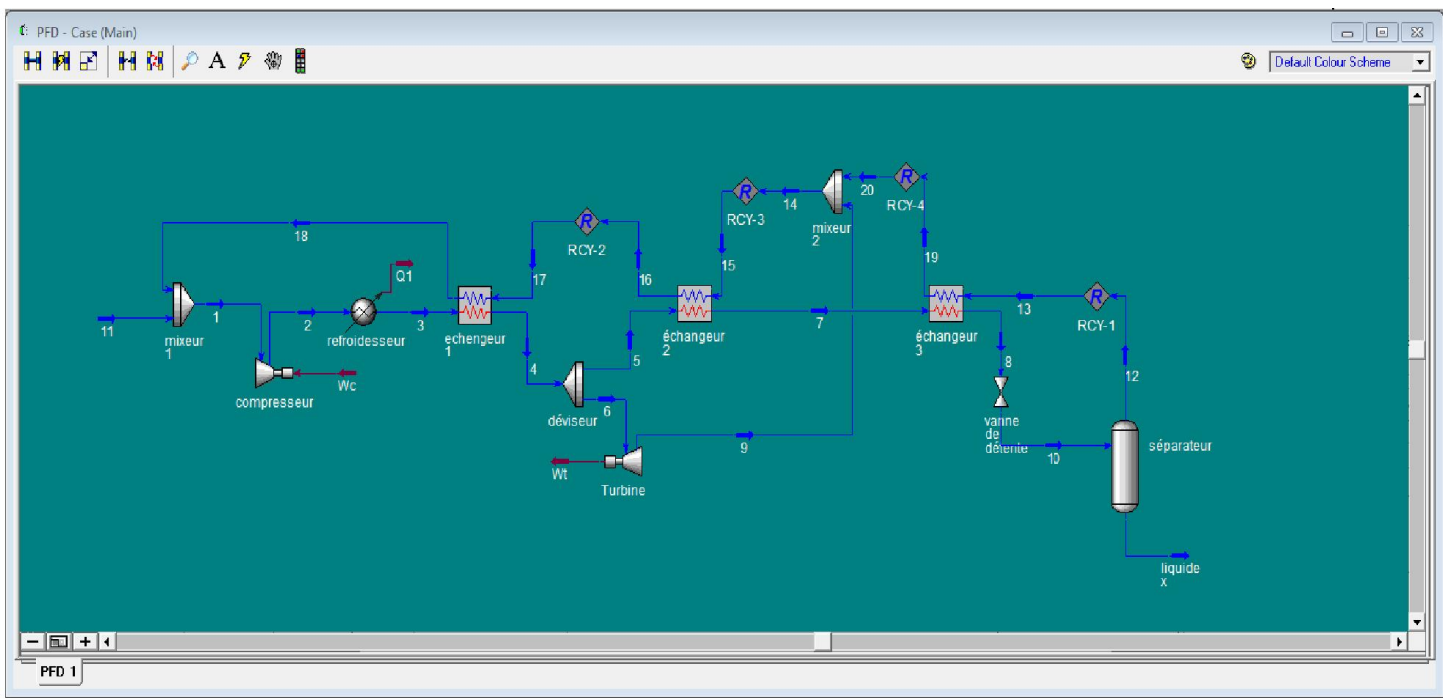


Figure IV.10 : PFD (Process Flow Diagram) de Cycle de CLAUDE pour la liquéfaction de l'Azote N₂

Le compresseur est modélisé isentropique avec un rendement isentropique de 85%. La pression de refoulement est de 200 bars et donc un rapport de pression de 200 / 1,0 est considéré.

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

L'Azote sous pression qui sort du compresseur est trop chaud pour entrer dans le côté du tube de l'échangeur de chaleur. Il devrait être refroidi dans un pré-refroidisseur jusqu'à 300 K et 200 bars est considéré. Il n'y a pas de perte de charge à l'intérieur.

Le fluide est refroidi et envoyé vers le premier échangeur de chaleur pour être refroidi d'avantage et alors il voit sa température chute jusqu'à $T = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ à pression constante.

Le fluide passé à travers un diviseur qui sépare une fraction définie de (10%) fluide du flux principal et est passé à travers une turbine. La partie restante du fluide passe à travers d'autres échangeurs de chaleur. Cette séparation aide à atteindre une température plus basse et les conditions de sortie souhaitées.

La partie du gaz est envoyée dans les échangeurs de chaleur pour être refroidi jusqu'à $T = -105.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ à pression constante.

En suite il est détendu dans la vanne de J-T jusqu'à la pression $P=100\text{KPa}$ à enthalpie constante la diminution de la pression est provoquée une baisse appréciable de la température jusqu'à $T=-195.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

le fluide est séparé en deux phases (X_{liq} , X_{vap}), pour l'acheminer dans un séparateur une fraction est liquéfiée et la partie restante retourne au rectifieur et en suite à un échangeur pour refroidir l'air chaud.

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

	Name	Pressure [kPa]	Temperature [C]	Mass Flow [kg/h]	Vapor / Phase Fraction	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]
▶	1	100	26.85	3600	1	46.344
	2	20000	1264.48	3600	1	40304.4
	3	20000	26.85	3600	1	-959.814
	4	20000	-12	3600	1	-2433.91
	5	20000	-12	3240	1	-2433.91
	6	20000	-12	360	1	-2433.91
	7	20000	-75	3240	1	-5178.53
	8	20000	-105	3240	1	-6743
	9	100	-188.835	360	1	-6164.86
	10	100	-195.914	3240	0.93294	-6743
	liquide x	100	-195.914	217.274	0	-11930.8
	12	100	-195.914	3022.73	1	-6370.1
	14	100	-142.971	3382.73	1	-4849.8
	15	100	-142.971	3382.73	1	-4849.8
	16	100	-51.2932	3382.73	1	-2220.98
	17	100	-51.2932	3382.73	1	-2220.98
	18	100	2.88053	3382.73	1	-652.202
	13	100	-195.914	3022.73	1	-6370.1
	19	100	-137.491	3022.73	1	-4693.18
	20	100	-137.491	3022.73	1	-4693.18
	11	100	388.041	217.274	1	10921.9

Tableau IV. 2: Résultat de simulation par HYSYS pour cycle de CLAUDE.

IV.4.1. Discussion des résultats

Du tableau ci-dessus la quantité d'air liquide produite est donnée par colonne (6)

- ❖ Le débit de l'Azote liquide est $\dot{m}_f = 217.274 \text{ kg/h}$
- ❖ la pression $P=100\text{KPa}$
- ❖ la température $T=-195.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ❖ fraction de vapeur : 0
- ❖ Puissance de la turbine $P_t = 13.32 \text{ KW}$

Le rendement thermodynamique :

$$y = \frac{m_e}{m} = \frac{360}{3600} = 0.1$$

$$x = \left(\frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_f} \right) + x \left(\frac{h_4 - h_9}{h_1 - h_f} \right)$$

$$x = \left(\frac{46.344 - (-959.814)}{46.344 - (-11930)} \right) + 0.1 \left(\frac{-2433.91 - (-6164.86)}{46.344 - (-11930)} \right) = 0.1151 = 11.51\%$$

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

IV.4.2. Flux de chaleur au niveau des échangeurs de chaleur

Les courbes ci-dessous représentent la variation de flux de chaleur au niveau des trois échangeurs en fonction de la température.

Chaque diagramme montre deux courbes le corps froid qui est la fraction non liquéfié, et l'autre caractérise le corps chaud qui est (l'azote à liquéfier)

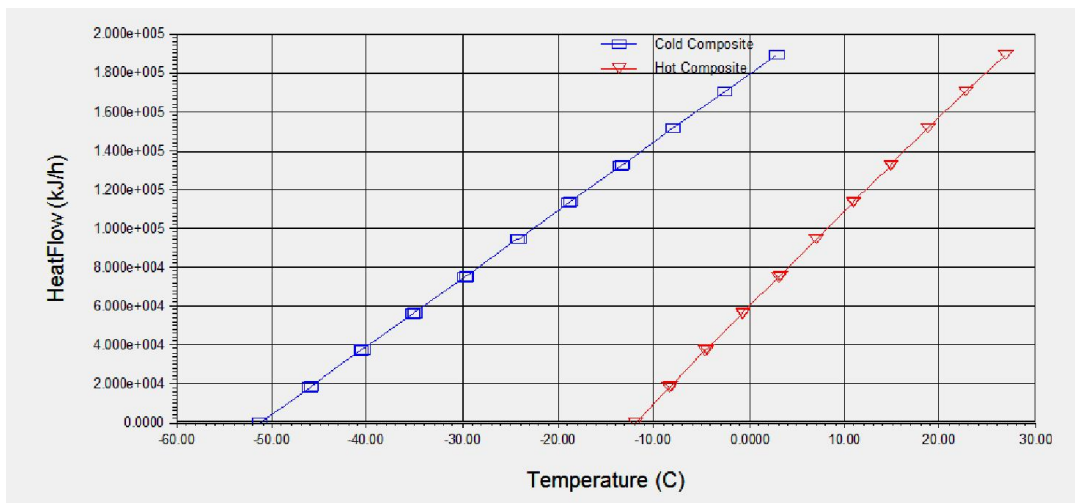


Figure IV. 11: Diagramme flux de chaleur en fonction de la température au de l'échangeur 1

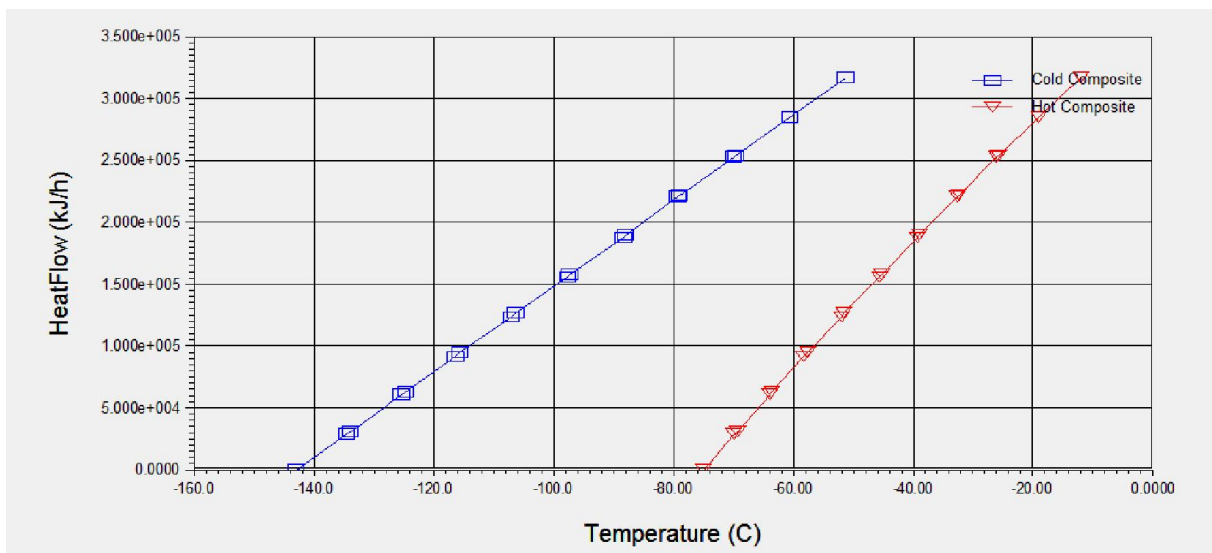


Figure IV. 12: Diagramme flux de chaleur en fonction de la température au de l'échangeur 2

Chapitre IV : Simulation du cycle de LINDE et du cycle de CLAUDE sur (Aspen HYSYS) pour la liquéfaction de l'Azote N₂

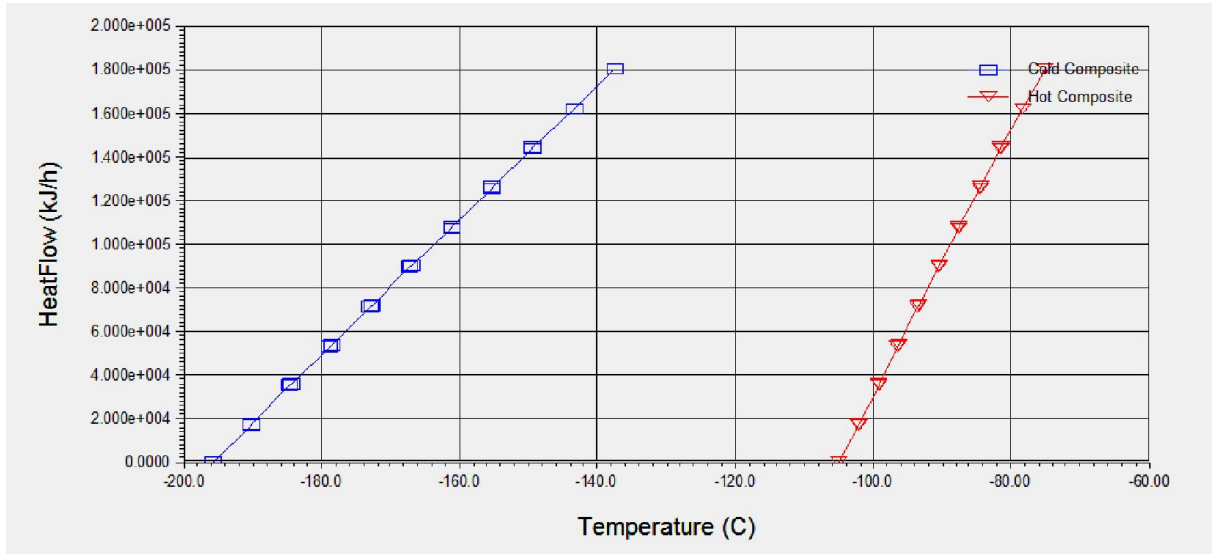


Figure IV. 13: Diagramme flux de chaleur en fonction de la température au de l'échangeur 3

IV.5. Discussion de résultat de la simulation

Le pourcentage de liquéfaction de cycle de LINDE est de 6.18 % alors que celui de cycle de CLAUDE est de 11.51 %, suggérant que ce dernier cycle est meilleur.

La valeur de rendement de cycle de CLAUDE est beaucoup plus élevée que celle de cycle de LINDE, ce qui implique que le cycle CLAUDE est un meilleur système de liquéfaction d'azote.

Le travail requis par unité de masse dans cycle de CLAUDE est le même que celui du système de cycle de LINDE si le travail de l'expandeur n'est pas utilisé pour aider à la compression

L'efficacité de divers systèmes est calculée en termes d'apport de travail par unité de liquide séparée et non uniquement en termes de rendement liquide seulement.

Conclusion général

Conclusion général

L'objectif de ce travail consistait en une étude théorique sur les cycles de la liquéfaction de l'azote et d'avoir une grande quantité liquéfiée de l'azote tout en consommant d'énergie minimale

On a opté pour le cycle de Linde et pour la liquéfaction de l'azote, vu les nombreux avantages qu'il présente. Trois paramètres d'opération de ce cycle ont été considérés et qui ont une influence importante sur les fonctions de performance à savoir :

- Lorsque la pression de compression augmente, le rendement en liquide augmente
- Lorsque la température de compression diminue, le rendement en liquide augmente
- Lorsque l'efficacité augmente, le rendement augmente de façon significative

L'exemple réalisé sur le logiciel Aspen HYSYS est une étude du procédés de production de l'azote liquide ont utilisant le cycle de Linde idéal et le cycle de Claude , nous avons simulé la quantité de liquéfaction de ces gaz en faisant varier les paramètres d'entrée de l'installation, savoir la quantité d'Air liquéfier nous donne des informations primordiales sur le rendement de l'installation ainsi les besoins énergétique (puissance électrique, puissance mécanique) à fournir et d'évaluer la quantité à fournir à fin de satisfaire les besoins du consommateur(clients).

Annexe

Annexe 1 :

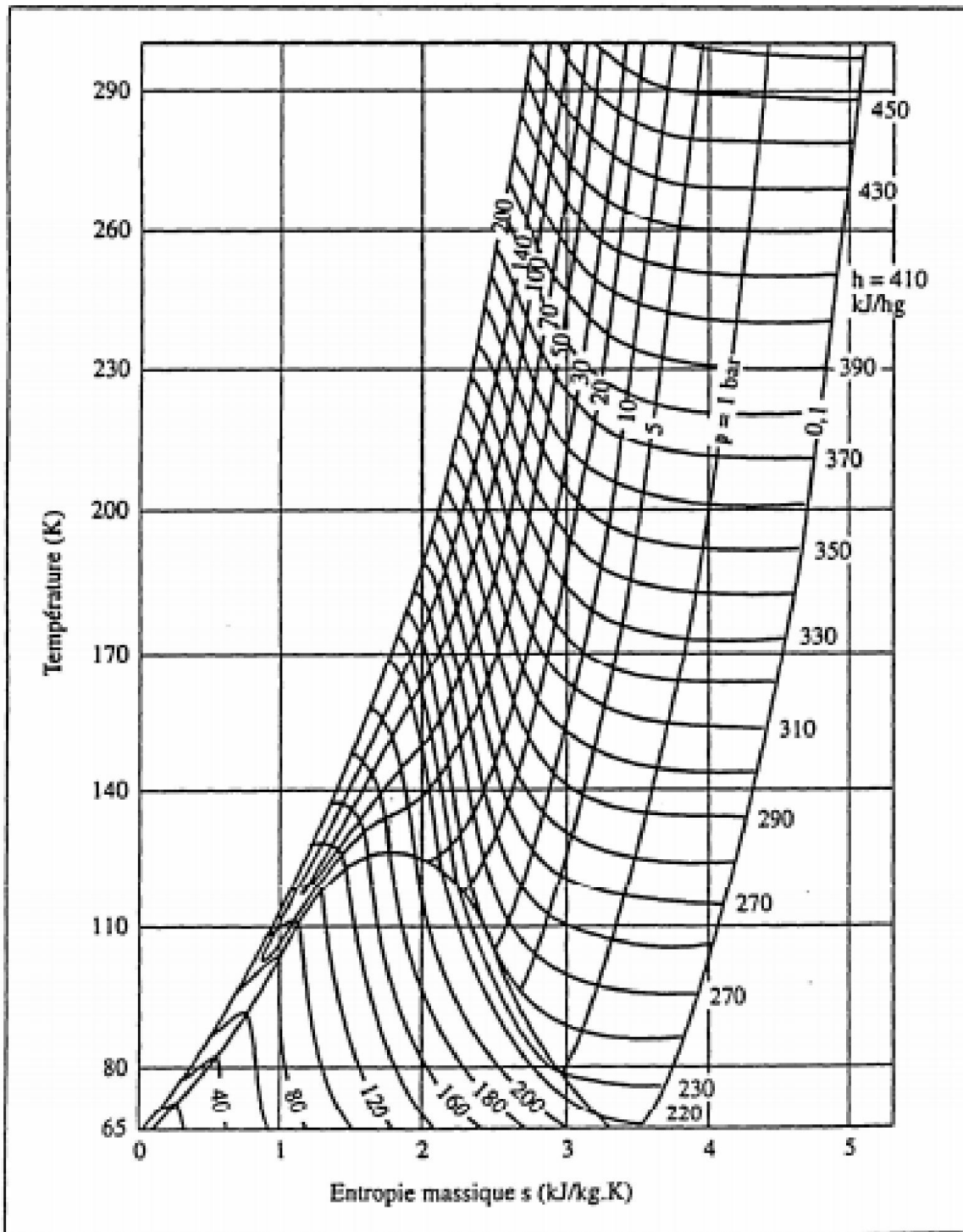
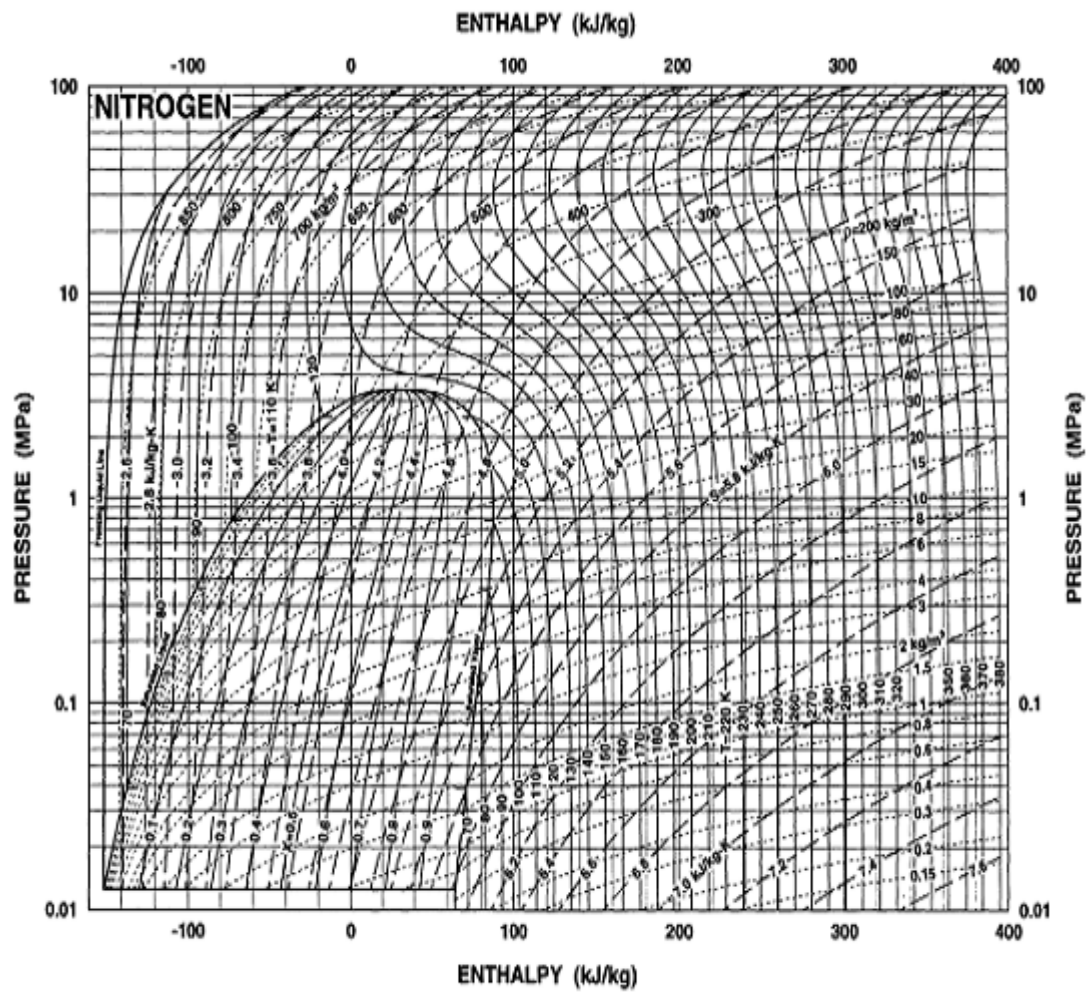


Diagramme de l'azote.

Annexe 2 :



P-H diagram for nitrogen ($P = 0.01-100$ MPa)

Références Bibliographiques

- [1] Air liquide Advanced technologies L'ingénierie de la cryogénie et des gaz.
- [2] WILLIAMSON (K.D) ET EDESKUTY (F, J) – Liquid Cryogens. Vol I : Theory and equipment Vol III Properties and Applications CRC Press.Inc (1983)
- [3] R.R. CONTE, Eléments de cryogénie, Masson et c^{ie} 1970.
- [4] CRYOGENIC SYSTEMS (second edition) by RANDALL F. BARRON
- [5] PHILIPPE LEBRUN, Cryophysique et Cryo-ingénierie .CERN, Organisation européenne pour la Recherche Nucléaire, Bulletin de l'IIF (2003).
- [6] Djelloul Amel, 'simulation de cycle de claudé pour la liquéfaction de l'air, de l'azote et de l'oxygène', mémoire magister, Alger2006, Constantine.
- [7] Technique De l'ingénieur.
- [8] HANDBOOK of Cryogenic Engineering (1998)
- [9] HASELDEN G.G. Cryogenic Fundamentals (1971).
- [10] Guillaume Hermosilla-Lara (Stockage de l'hydrogène par adsorption sur charbon actif : Etude des effets thermiques lors de la charge dynamique d'un réservoir à lit fixe adsorbant), THÈSE DE DOCTORAT, joseph fourier – grenoble 1, février 2007.
- [11] A.ARKHARON Theory and design of Cryogenic Systems (1981)
- [12] cours cryogénie Mr sari à UBM-ANNABA Anne 2017/2018
- [13] EDESKUTY,F,J and K.D.WILLIAMSON- liquid cry ogens, vols 1 and 2 , CRC PRESS.Boca Roton, Fl orida (1983).
- [14] mémoire fin d'étude en master de DJELLOUL AMEL « SIMULATION DE CYCLE DE CLAUDE POUR LA LIQUÉFACTION DE L'AIR, DE L'AZOTE ET DE L'OXYGÈNE » 2006
- [15] : Thermodynamique une approche pragmatique, Yunes Cengel ,2009
- [16] RANDALL F.BARRON- Cryogenic Systems – Oxford university press, New York, Clarendon press, Oxford (1985).
- [17] DESMOND E Winter bone – Advanced thermodynamics for engineers, (1997).
- [18] Polycopie du TP simulation des procédés industriels conformément au programme officiel (L3 GP). Établie par : Mr Y. BOUDJEMAA Année 2016/2017
- [19] the Linde groupe, gaz industrielle France.